

Jacqueline Damm

---

**DIPLOMARBEIT**

---

**Entwicklung von Qualitätssicherungssystemen in der  
automatisierten Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen**

**HOCHSCHULE MITTWEIDA**

---

**UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES**

Wirtschaftswissenschaften

Mittweida, 2011

Jacqueline Damm

---

## **DIPLOMARBEIT**

---

### **Entwicklung von Qualitätssicherungssystemen in der automatisierten Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen**

Wirtschaftswissenschaften

Augsburg, 2011

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Gebhardt

Zweitprüfer: Dipl.-Ing.(FH) Christoph Tammer

## **Bibliographische Beschreibung:**

Damm, Jacqueline:

Entwicklung von Qualitätssicherungssystemen in der automatisierten Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen. - 2011. - 133 Seiten

Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences

Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Diplomarbeit

Eingereicht am: 31. Januar 2011

Inhalt: 71 Seiten

Anhang: 45 Seiten

## **Referat:**

Ziel dieser Diplomarbeit war es relevante Qualitätssicherungssysteme für die automatisierte Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen zu finden. Bei der Untersuchung des Produktes, sowie der Herstellungsprozesse wurden im Rahmen der Arbeit Kriterien priorisiert, sowie messtechnische Erfassungsarten recherchiert und bewertet. Diese Kriterien sind die Feuchtemessung, die Partikelerkennung, die Kantentopografie und das Fügen der Ableiterföhnchen. Für die Partikelerkennung wurden Versuche durchgeführt und entsprechend ausgewertet.

## **Abstract:**

The purpose of this diploma thesis is to find relevant quality assurance systems for the manufacturing of lithium ion cells. By the verification of the product and the production processes quality related criteria were prioritized, different kinds of measurement-technology detections researched and valued. These criteria are the particle detection, the adding the conductor banneret, the moisture measurement and the edge topography. For the particle detection there will conducted a couple of pretest and accordingly evaluated.

## Danksagung

Mein Dank gilt dem Projektteam Team Christoph Tammer, Michael Wiedmann, Matthias Glonegger, Martin Wunderer und Christian Thiemann, die es mir ermöglicht haben einen so tiefen Einblick in die Materie zu erhalten und die mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen.

Bedanken möchte ich mich weiterhin bei meinem Hochschulbetreuer Professor Gerhard Gebhardt, der meine Diplomarbeit betreut und mir zahlreiche Tipps gegeben hat.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei allen Hochschulprofessoren, die mich während meines Studiums begleitet, Ihr Wissen mit uns geteilt und uns so vieles gelehrt haben.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, die mich bei allem unterstützt und mir Kraft gegeben haben.

*Vielen Dank!*

„Es ist nicht genug zu wissen - man muss es auch anwenden.

Es ist nicht genug zu wollen - man muss es auch tun.“

Johann Wolfgang von Goethe

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis .....	VI
Abkürzungsverzeichnis .....	VII
1. Einleitung.....	1
1.1. Ausgangssituation.....	1
1.2. Zielsetzung.....	3
1.3. Vorgehensweise .....	3
2. Grundlagen.....	4
2.1. Automobilbranche in Deutschland .....	4
2.2. Elektromobilität .....	7
2.2.1. Warum Elektroautos? .....	8
2.2.2. Elektromobilität Heute .....	10
2.2.3. Energiebedarf.....	11
2.3. Lithium .....	13
2.3.1. Eigenschaften.....	13
2.3.2. Anwendungsbereiche .....	13
2.4. Marktübersicht .....	15
2.4.1. Entwicklung in Deutschland.....	15
2.4.2. Einfließende Branchen .....	16
2.5. Stand der Wissenschaft und Technik.....	19
2.5.1. Batterietypen und Batteriekosten.....	19
2.5.2. Lithium-Ionen-Batterie .....	21
2.5.2.1. Aufbau .....	23
2.5.2.2. Funktion .....	25
2.5.3. Herstellungsprozess der Lithium-Ionen-Zellen .....	26
2.5.4. Kernprozess / Zellbildung .....	28
2.5.4.1. Flachwickeln .....	28
2.5.4.2. Stapeln.....	29
2.5.4.3. Falten.....	31
2.5.4.3.1. Laminier-Z-Faltung.....	31
2.5.4.3.2. Separator-Z-Faltung.....	32

3. Qualitätssicherung im Aufbau der Li-Ionen-Zellverbund-Einheiten .....	34
3.1. Qualitätsrelevante Merkmale für die Prozessqualität .....	34
3.2. Qualitätsrelevante Merkmale für die Produktqualität.....	35
3.3. Feuchtigkeitsmessung .....	39
3.3.1. Messung der Infrarot-Reflexion .....	40
3.3.2. Messung der elektrischen Leitfähigkeit.....	41
3.3.3. Messung der Dielektrizitätskonstante .....	42
3.3.4. Messung der Mikrowellen-Absorption.....	42
3.3.5. Messung der Neutronenstreuung .....	43
3.3.6. Messung der Luftfeuchte .....	44
3.3.7. Wärmefluss-Thermographie .....	45
3.4. Randtopografie beim Schneiden .....	47
3.4.1. Fokusvariation .....	47
3.4.2. Streifenprojektion.....	48
3.4.3. Laser 2D Wegmesssensor .....	49
3.5. Zerstörungsfreies Prüfen der Ableiterfährchen.....	50
3.5.1. Ultraschallprüfung.....	51
3.5.2. Lichtschnittverfahren .....	51
3.5.3. Wärmefluss-Thermographie .....	52
3.6. Partikelerkennung .....	54
3.6.1. Streiflicht Verfahren .....	54
3.6.2. Shape from Shading.....	55
3.6.3. SPARC 3D-Oberflächeninspektion.....	56
3.6.4. Laser 2D Wegmesssensor .....	56
3.6.5. Weißlicht-Interferometrie .....	57
3.6.6. Thermografie .....	58
3.6.7. Hochauflösende Zeilenkameras und Bildverarbeitungssysteme ..	58
3.6.8. Experimentelle Untersuchung zur Partikelerkennung.....	60
3.7. Integration in den Herstellungsprozess .....	64
4. Zusammenfassung .....	67
5. Ausblick .....	71
Anhang.....	72
Literaturverzeichnis .....	117

Selbständigkeitserklärung .....	118
---------------------------------	-----

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteil an der weltweiten PKW-Produktion 2008 .....	4
Abbildung 2: Anteile an der F&E-Aufwendungen 2008 .....	5
Abbildung 3: Subventionen für Elektroautos .....	6
Abbildung 4: Zeitplan des Nationalen Entwicklungsplans für Elektromobilität....	6
Abbildung 5: Produktion von Elektrofahrzeugen 2009 .....	10
Abbildung 6: Stromquellen für Elektrofahrzeuge .....	12
Abbildung 7: Anwendungsbereiche von Lithium.....	14
Abbildung 8: Gesamt-System Elektromobilität .....	17
Abbildung 9: Gesamtstromverbrauch über den Tag.....	17
Abbildung 10: Reichweiten.....	20
Abbildung 11: Batteriekosten .....	21
Abbildung 12: Aufbau .....	23
Abbildung 13: Funktion .....	25
Abbildung 14: Prozessablauf.....	27
Abbildung 15: Flachwickeln.....	29
Abbildung 16: Stapeln .....	30
Abbildung 17: Laminier-Z-Faltung .....	32
Abbildung 18: Separator-Z-Faltung .....	33
Abbildung 19: Inline-Feuchtemessung mit Infrarottechnik.....	40
Abbildung 20: Feuchtemessgerät.....	41
Abbildung 21: Feuchtemess-Sensor .....	42
Abbildung 22: Inline-Feuchtemessung mit Mikrowellentechnik .....	43
Abbildung 23: Neutronen-Feuchtemessung .....	44
Abbildung 24: Messung der Luftfeuchte .....	45
Abbildung 25: Feuchte Stelle im Fußboden .....	45
Abbildung 26: Randtopografie beim Schneiden .....	47
Abbildung 27: Fokusvariation .....	48
Abbildung 28: Streifenprojektion .....	48
Abbildung 29: Laser 2D Wegmesssensor .....	49
Abbildung 30: Ultraschallprüfung .....	51
Abbildung 31: Lichtschnittverfahren .....	52
Abbildung 32: Wärmefluss-Thermographie .....	53
Abbildung 33: Streiflicht Verfahren, Edelstahloberfläche .....	55
Abbildung 34: Shape from Shading.....	55
Abbildung 35: SPARC 3D-Oberflächeninspektion.....	56
Abbildung 36: Weißlicht-Interferometrie .....	57
Abbildung 37: Hochauflösende Zeilenkamera.....	58
Abbildung 38: Hell- und Dunkelfeld .....	59
Abbildung 39: Versuchsaufbau .....	60
Abbildung 40: LED-Leuchte Kathode .....	62



Abbildung 41: LED-Leuchte Anode .....	63
Abbildung 42: LED-Leuchte Anode 10° .....	64
Abbildung 43: Intelligenter Zuschnitt .....	71
Abbildung 44: Punktuelle Reinigung .....	71
Abbildung 45: „Elektromote“ .....	76
Abbildung 46: CO <sub>2</sub> -Emissionen in Deutschland 1990 .....	77
Abbildung 47: CO <sub>2</sub> -Emissionen in Deutschland 2007 .....	77
Abbildung 48: Voraussetzungen für den Kauf .....	78
Abbildung 49: Gründe gegen Elektroautos .....	79
Abbildung 50: Batteriewechselkonzept .....	81
Abbildung 51: Induktionsladung .....	82
Abbildung 52: E-Carsharing .....	83
Abbildung 53: Salar de Atacama .....	84
Abbildung 54: Aufteilung der identifizierten Reserven und Ressourcen .....	85
Abbildung 55: Übersicht Batterien für Elektrofahrzeuge – Deutschland .....	86
Abbildung 56: Patente zu Li-Ionen weltweit .....	87
Abbildung 57: Abmessungen von Separator .....	88
Abbildung 58: Abmessungen der Kathode .....	88
Abbildung 59: Abmessungen der Anode .....	89
Abbildung 60: Prozesskette .....	90
Abbildung 61: Prozessdarstellung Stapeln .....	91
Abbildung 62: Prozessdarstellung Stapeln .....	92
Abbildung 63: Prozessdarstellung Laminier-Z-Faltung .....	93
Abbildung 64: Prozessdarstellung Separator-Z-Faltung .....	94
Abbildung 65: Materialfeuchtemessverfahren .....	106
Abbildung 66: Lasertriangulationsverfahren .....	109
Abbildung 67: Rechtwinkliges Dreieck .....	112
Abbildung 68: Versuchsbilder Kathode .....	114
Abbildung 69: Versuchsbilder Anode .....	115

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Batterietypen .....	20
Tabelle 2: Prozessqualität .....	35
Tabelle 3: Produktqualität .....	36
Tabelle 4: Feuchtemessung .....	46
Tabelle 5: Randtopographie .....	50
Tabelle 6: Prüfverfahren der Ableiterfähnchen .....	53
Tabelle 7: Produktspezifische Angaben der Separatorfolie .....	88
Tabelle 8: Produktspezifische Angaben der beschichteten Aluminiumfolie .....	89
Tabelle 9: Produktspezifische Angaben der beschichteten Kupferfolie .....	89
Tabelle 10: Gewichtete Punktbewertung .....	95
Tabelle 11: a) Qualitätsrelevante Faktoren .....	97
Tabelle 12: b) Qualitätsrelevante Faktoren .....	98
Tabelle 13: c) Qualitätsrelevante Faktoren .....	99
Tabelle 14: Kritische Einflussfaktoren .....	100
Tabelle 15: a) Gewichtungsmatrix .....	101
Tabelle 16: b) Gewichtungsmatrix .....	102
Tabelle 17: c) Gewichtungsmatrix .....	103
Tabelle 18: d) Gewichtungsmatrix .....	104
Tabelle 19: Sensorarten .....	105
Tabelle 20: Online-Messverfahren für die Feuchtebestimmung .....	107
Tabelle 21: Pflichtenheft Randtopografie beim Schneiden .....	108
Tabelle 22: Thermografie für die zerstörungsfreie Materialprüfung .....	110
Tabelle 23: Pflichtenheft Partikelerkennung .....	111
Tabelle 24: Abstandsmessungen .....	112

## Abkürzungsverzeichnis

Bks	Bahnkantensteuerung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Bsr	Bahnspannungsregelung
BYD	Build Your Dreams
DeLIZ	Demonstrationszentrum für Lithium-Ionen-Zellen
F&E	Forschung und Entwicklung
FAZ	Frankfurter Allgemeine Zeitung
Fm	Feuchtemessung
Fraunhofer IAO	Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
Fraunhofer IPA	Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
Fraunhofer ISI	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung
Fraunhofer IWS	Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik
Fraunhofer IWU	Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
HWWI	Hamburgisches Welt Wirtschafts Institut
IAV GmbH	Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr GmbH
IR	Infrarot
iwb	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften/ Technische Universität München
KPs	Kameragestütztes Positionierungssystem
Kt	Kantentopographie
LCE	Lithiumcarbonat-Äquivalente
Li	Lithium
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PdAf	Prüfung der Ableiterfähnchen
Pe	Partikelerkennung
PG	Projektgruppe

PKW	Personenkraftwagen
PwC	PricewaterhouseCoopers
RMV	Ressourceneffiziente Mechatronische Verarbeitungsmaschinen
SPARC	Surface Pattern Analyzer and Roughness Calculator
USGS	U.S. Geological Survey
VDA	Verband der Automobilindustrie
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung

# 1. Einleitung

## 1.1. Ausgangssituation

Elektromobilität ist die Zukunft, weil dadurch die CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Lärmbelastung in großen Städten der Welt sinken. Das Potenzial für Elektromobilität steht und fällt mit der Batterietechnologie. Batterien für Elektrofahrzeuge sind zu diesem Zeitpunkt noch sehr teuer, sie müssen günstiger und in der Reichweite verbessert werden. Um die Kosten für Lithium-Ionen-Batterien zu senken, sind vor allem Fortschritte in der Produktionstechnik erforderlich. Insbesondere in Deutschland gibt es kaum Serienfertigungen. Bei den Wenigen sind noch Schwachstellen in der Produktion vorhanden. Viele Prozesse sind nicht ausgereift und nur vereinzelte Qualitätssicherungsmaßnahmen kommen zum Einsatz. Es besteht also noch viel Optimierungspotenzial, gerade weil bei Autobatterien die Sicherheitsanforderungen höher als bei einem gewöhnlichen Handyakkumulator sind. Im Rahmen des Forschungsprojektes „Demonstrationszentrum für Lithium-Ionen-Zellen“, kurz auch DeLIZ genannt, werden die notwendigen Fertigungskonzepte erarbeitet und die Bearbeitungs- und Handhabungsprozesse erforscht, die eine wirtschaftliche Massenproduktion ermöglichen.

An dem Projekt DeLIZ arbeiten verschiedene Projektpartner mit, zum Einen Unternehmen die auf dem Gebiet der Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien sehr erfahren sind, wie die Evonik Litarion GmbH, die Li-Tec Battery GmbH und die Daimler AG. Zum Anderen Forschungseinrichtungen, wie das *iwb*, die TU Dresden, das Fraunhofer IWS und das Fraunhofer IWU Projektgruppe RMV (Institutsprofil im Anhang unter I.). Gefördert wird dieses Projekt durch das BMBF im Rahmen des Konjunkturpakets II. Ziel ist es ein Demonstrationszentrum in Garching bei München zu errichten. Geforscht wird an neuen Lösungsansätzen für eine kostengünstige Serienfertigung, einhergehen innovative Produktionstechniken und prozessübergreifende Qualitätssicherungssysteme.

Dabei gliedert sich das Projekt in sieben Arbeitspakete:

- Arbeitspaket 1 - Erstellung von Lastenheft und Konzepten zur voll- und teilautomatischen Fertigung
- Arbeitspaket 2 - Beschichten im Rolle-zu-Rolle-Verfahren
- Arbeitspaket 3 - Konfektionieren der Elektroden und Separatoren
- Arbeitspaket 4 - Integrierte Montage geometrisch bestimmter Zellgeometrien
- Arbeitspaket 5 - Montage geometrisch unbestimmter Zellgeometrien
- Arbeitspaket 6 - Fügen der Folienpakete und nachfolgende Prozesse
- Arbeitspaket 7 - Prozessübergreifende Qualitätssicherung

Die vorliegende Arbeit ist thematisch vorrangig in den Arbeitspaketen Vier und Sieben angesiedelt.

Das Fraunhofer IWS und die TU Dresden beschäftigen sich mit der Optimierung der Beschichtungsverfahren und des Bereitstellens der fertigen Elektroden- und Separatorfolien. Außerdem befassen sie sich mit dem Prozess des Ableiterfügens und führen Voruntersuchungen zu Lasertrennverfahren für die Elektroden und den Separator durch. Die Fertigungsprozesse im Trockenraum werden in Zusammenarbeit zwischen dem *iwb* und dem Fraunhofer IWU Projektgruppe RMV umgesetzt. Dabei liegt der Fokus des *iwb* auf der Entwicklung der Konzepte, Technologien und der Systemtechnik für die automatisierte Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen, ausgehend von der Rollenware bis zum fixierten Zellstapel.

Das Fraunhofer IWU Projektgruppe RMV ist vorrangig für die Qualitätssicherung in den Prozessen von der Rollenware bis hin zum Fügen der Ableiterfährnchen zuständig. Dabei wird der Einfluss einzelner Prozessparameter auf die Qualität der Zellen analysiert. Prüfverfahren werden ermittelt und aufbereitet. Zudem kann die Einrichtung eines qualitätssichernden Regelkreises den Ressourcenverbrauch bei der Produktion von Lithium-Ionen-Zellen, durch zum Beispiel weniger Ausschuss, senken.

Die Montageschritte Verpacken und Befüllen der Zellstapel mit Elektrolyt bearbeitet die Firma Li-Tec.

## **1.2. Zielsetzung**

Ziel dieser Diplomarbeit ist es auf die Notwendigkeit von Elektromobilität einzugehen. Zu untersuchen ist, wie weit die Technik fortgeschritten ist und welches Potenzial es besitzt. Der Herstellungsprozess muss analysiert und enthaltene Schwachstellen herausgefiltert werden. Der Schwerpunkt hierbei liegt auf der Suche nach möglichen Einflussfaktoren auf den Herstellungsprozess von Lithium-Ionen-Zellen und auf das Produkt selbst. Durch eine Gewichtung sollten die Einflussfaktoren priorisiert und für die stärksten Einflussfaktoren geeignete Prüfverfahren gefunden werden.

## **1.3. Vorgehensweise**

Der erste Schritt ist sich in die Thematik einzulesen, um einen groben Überblick und das Gefühl für die Thematik zu bekommen. In der nächsten Handlung muss der Stand der Wissenschaft und Technik von Lithium-Ionen-Batterien aufgearbeitet werden. Danach folgt der dritte Schritt, die Recherche über technische Prüfverfahren und geeignete Qualitätssicherungssysteme. Nachkommend müssen Qualitätsfaktoren und Prozessparameter gesammelt und identifiziert werden.

Als nächstes würde sich eine Gewichtungsmatrix anbieten, um die wichtigsten Parameter mit dem größten Einfluss herauszufiltern. Bei Expertengesprächen könnten dann die einfließenden Parameter quantifiziert werden. Für die kritischen Faktoren Einflussfaktoren werden Prüfverfahren gesucht, gegenübergestellt und einige Prüfverfahren in die engere Auswahl genommen. Die Prüfverfahren in der engeren Auswahl werden noch einmal gegenübergestellt und ein geeignetes System herausgefiltert. Nach der Durchführung und Auswertung von Versuchen und Experimenten zur Partikelerkennung ist es möglich Verfahren zu verifizieren oder zu falsifizieren.

## 2. Grundlagen

### 2.1. Automobilbranche in Deutschland

Die Automobilbranche beschäftigt rund 800.000 Arbeitnehmer in mehr als 1.000 Unternehmen [5].

Die deutschen Automobilhersteller sind in Europa Spitzenreiter und nehmen in der Welt den dritten Platz hinter Japan und den USA ein [5]. Sie produzierten 2009 rund 10,5 Millionen Autos, davon wurden 5,2 Millionen in Deutschland hergestellt [138]. [Abb.1]

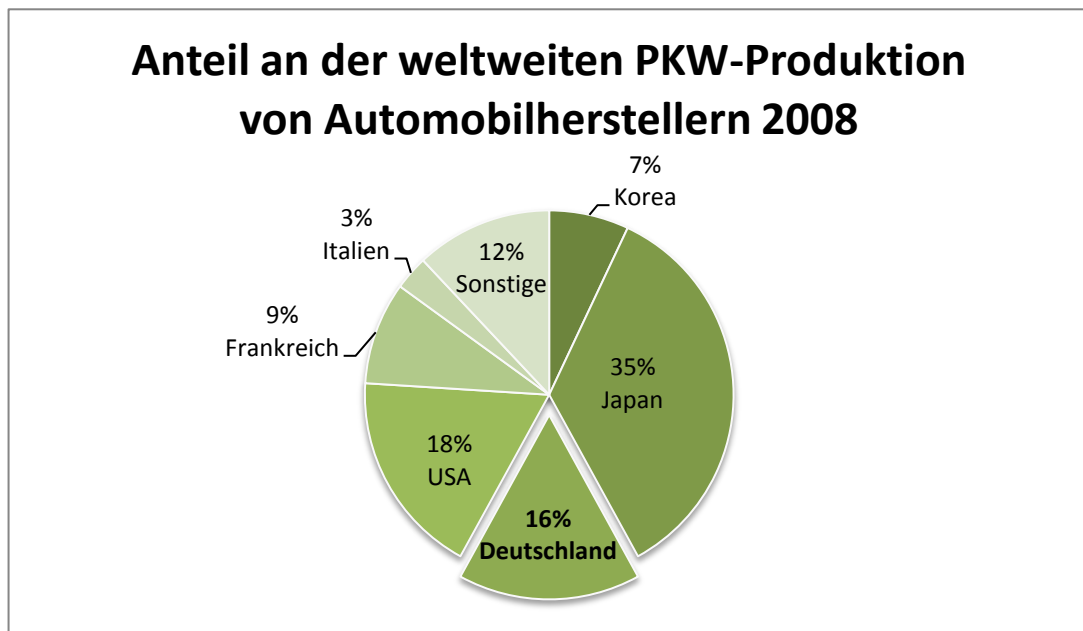


Abbildung 1: Anteil an der weltweiten PKW-Produktion 2008  
Quelle: [5]



Diese Branche trägt mehr als ein Drittel des Gesamtaufwands der deutschen Wirtschaft für Forschung und Entwicklung [5]. [Abb.2]

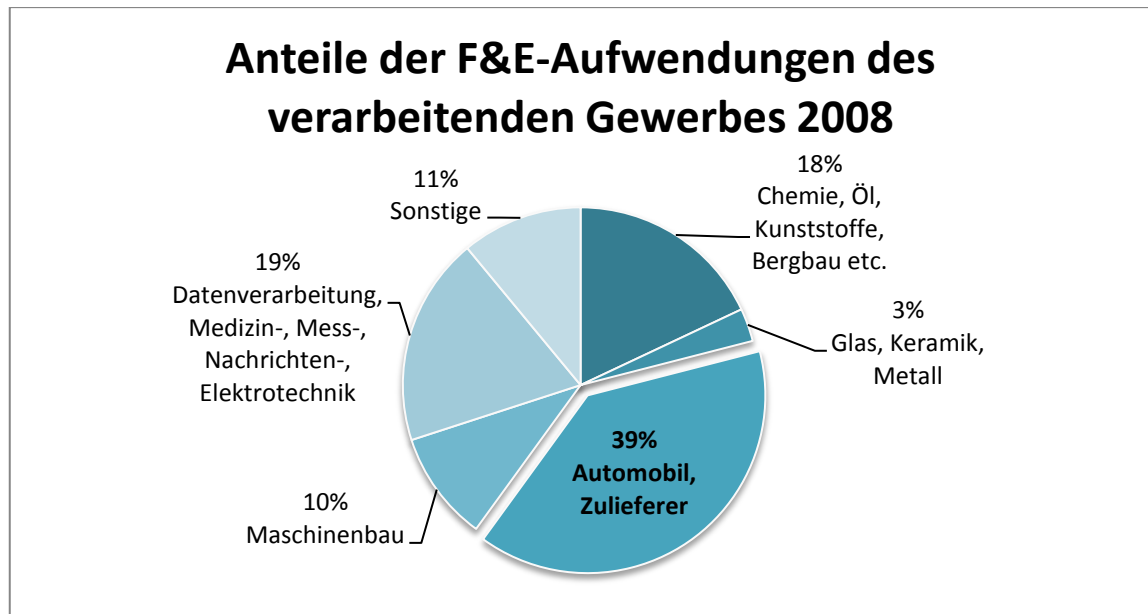


Abbildung 2: Anteile an der F&E-Aufwendungen 2008  
Quelle: [5]

Im August 2009 verabschiedete das Bundeskabinett einen Nationalen Entwicklungsplan für Elektromobilität. In diesem steht, dass bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge über Deutschlands Straßen rollen sollen. Dies sind allerdings gerade einmal zwei Prozent aller heute in Deutschland zugelassenen Kraftfahrzeuge (49,6 Millionen zum 1. Januar 2009 [102]). Bis 2030 sollen es fünf Millionen Elektrofahrzeuge sein. [16]

Um dies zu realisieren, hat die Bundesregierung letztes Jahr im Konjunkturpaket II 500 Millionen Euro zur Förderung bereitgestellt. [Abb.3]



Abbildung 3: Subventionen für Elektroautos  
Quelle: [10]

In acht deutschen Städten, darunter Hamburg und Berlin/Potsdam, soll der Aufbau und der Betrieb einer Infrastruktur für Elektrofahrzeuge erprobt werden. Neben der deutschen Automobil- und Zulieferindustrie sollen auch Energieversorger, Stadtwerke, Informations- und Kommunikationstechnologie-Dienstleister, Forschungseinrichtungen oder Kommunen von den Maßnahmen des Konjunkturpakets II profitieren. [22]

Einen Schwerpunkt der Förderung bildet mit einem Volumen von 115 Millionen Euro das Projekt „Modellregionen Elektromobilität“ des Verkehrsministeriums. In diesem Projekt wird die Alltagstauglichkeit von Elektrofahrzeugen und Ladeinfrastruktur getestet. Bis 2011 soll so der Markt für Elektrofahrzeuge vorbereitet werden und bis 2020 soll die Marktdurchdringung erfolgen. [22] [Abb.4]

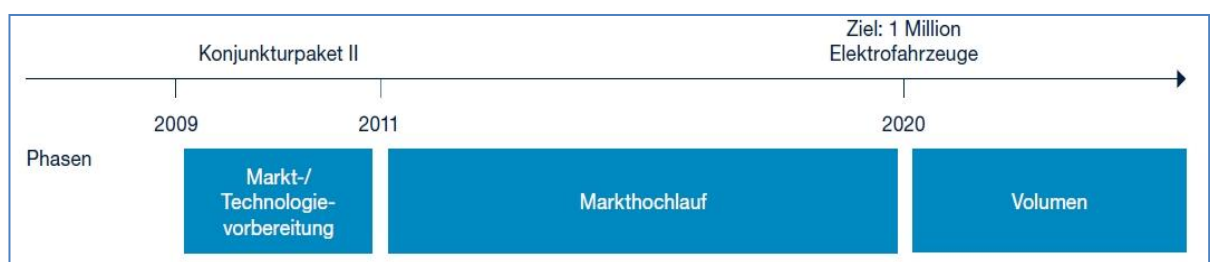


Abbildung 4: Zeitplan des Nationalen Entwicklungsplans für Elektromobilität  
Quelle: [22]

## 2.2. Elektromobilität

Ein Elektroauto ist ein durch elektrische Energie angetriebenes Automobil. Der Begriff Elektromobilität beschreibt den Einsatz und die Rahmenbedingungen für Elektrofahrzeuge. [101]

Zumeist wird die Antriebsenergie in Form von aufladbaren Akkumulatoren im Fahrzeug mitgeführt. Eine Ausnahme bildet das Mondauto, welches nicht wiederaufladbare Batterien verwendet. Brennstoffzellenfahrzeuge<sup>1</sup>, serielle Hybridautos und Fahrzeuge mit dieselektrischem Antrieb<sup>2</sup> nutzen verschiedene Kraftstoffe als Primärenergie, um daraus den Antriebsstrom herzustellen. Beim Gyroantrieb wird die Antriebsenergie mechanisch in einem Schwungrad („Rotor“) gespeichert, bis sie von einem Generator in elektrische Energie für die Fahrmotoren umgewandelt wird. Solarfahrzeuge gewinnen den Strom direkt aus Sonnenlicht mittels Solarzellen auf ihren Oberflächen. [80]

Informationen über das erste Elektroauto von Werner von Siemens finden Sie im Anhang unter II.I.

Viele Komponenten fallen bei einem reinen Elektromobil weg, so wird die Umstellung für die Automobilindustrie und ihre Zulieferer nicht einfach werden. Folgende vertraute Teile entfallen [5]:

*„Anlasser / Auspuffanlage / Bremshydraulik (Motoren bremsen teils rein elektrisch, teils mit elektrisch verstellten Reibungsbremsen) / Differenzialgetriebe / Fahrwerk (Räder werden elektrisch geführt, gefedert und gedämpft) / Kardanwelle / Katalysator / Kühler / Kühlergrill / Kupplung / Lenkungshydraulik (elektrische Steuerung, steer-by-wire) / Lenksäule / Lichtmaschine / Motorblock (womöglich Motoren in den Rädern) / Ölwanne / Rad-Antriebswellen / Schaltgetriebe / Schaltknüppel/ -gestänge / Bleibatterie / Stoßdämpfer (elektorrheologische Fluide (ERF)) / Tank (Polymerfolienakku im Boden und der Karosserie) / Zündanlage, Pumpen, Luftfilter und andere Hilfsaggregate.“*

*BMBF „Elektromobil in die Zukunft“*

---

<sup>1</sup> Elektrische Energie wird durch Wasserstoff oder Methanol durch eine Brennstoffzelle erzeugt.

<sup>2</sup> Die von Dieselmotoren erzeugte mechanische Energie wird mit Hilfe eines Generators in elektrische Energie umgewandelt.

Warum Elektroautos so Bedeutend für die Zukunft sind und wieso so viel Wert auf sie gelegt wird, ist im folgenden Abschnitt dargestellt.

### 2.2.1. Warum Elektroautos?

Die Motorisierung und das Verkehrsaufkommen werden zukünftig weiter zunehmen. Die OECD prognostiziert einen PKW Anstieg für die Länder China, Indien, Russland, Indonesien und Brasilien um 438 Millionen Stück bis 2030. Gleichzeitig wird die Urbanisierung<sup>3</sup> ansteigen, bis 2050 sollen rund zwei Drittel der Weltbevölkerung in Städten leben. Daraus ergeben sich die Probleme der Luftverschmutzung, der Lärmbelästigung und der zunehmenden Staus. [16]

Politische Ziele sind unter anderem vom Öl unabhängiger zu werden. Die Ölserven sind begrenzt und werden zunehmend teurer. [83]

Weil der Feinstaub die Innenstädte belastet, soll der CO<sub>2</sub>-Ausstoß deutlich verringert werden. Das Umweltbundesamt hat das Ziel gesetzt, die durch den Verkehr verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030 um 50% gegenüber dem Jahr 1990 zu verringern, um das Klimaziel von maximal zwei Grad Celsius Erderwärmung zu erreichen. Betrachtet man die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland (Anhang Punkt II.II.) erkennt man, dass vom Jahr 1990 zum Jahr 2007 die Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emissionen um 19% gesunken sind. In dem Sektor Verkehr sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen von 165,76 Millionen auf 151,38 Millionen gefallen. [103] Diese minimale Rate führt zur Notwendigkeit, eventuelles Einsparungspotential auszuschöpfen, wie zum Beispiel durch den Ansatz Elektromobilität.

Die Lärmbelästigung in Wohngebieten soll auf 65 dB(A) am Tag und in der Nacht auf 55 dB(A) begrenzt werden [16]. Elektroautos verfügen über einen sehr geräuscharmen Antrieb, dies bewährt sich vor allem im Großstadtverkehr. Eine weitere Treibkraft für die Entwicklung von Elektromobilität sind die rasant steigenden Einkommen in zahlreichen Regionen der Welt. In Asien wird bis 2030 ein Wachstum des Pro-Kopf-Einkommens<sup>4</sup> von jährlich fünf Prozent erwartet. Herausgefunden wurde, dass Länder mit einem relativ hohen Pro-Kopf-

---

<sup>3</sup> Verstädterung. Vermehrung, Ausdehnung oder Vergrößerung von Städten.

<sup>4</sup> Ist das aufs Jahr berechnete Durchschnittseinkommen der Einwohner eines Landes.

Einkommen mehr PKW's besitzen als jenen mit relativ niedrigem Pro-Kopf-Einkommen. [16]

Die Elektromotoren zeichnen sich weiterhin durch einen höheren Wirkungsgrad aus als die Diesel- und Ottomotoren. Elektroautos besitzen einen Effizienzgrad<sup>5</sup> von circa 80%. Ein Verbrennungsmotor dagegen hat einen Wirkungsgrad<sup>6</sup> von maximal 30%. [16]. Elektromotoren sind zudem einfacher aufgebaut als Verbrennungsmotoren, viele Teile entfallen bei ihm, wie unter 2.2. aufgezeigt. Dadurch gibt es weniger Verschleiß und die Elektromotoren sind damit wartungsarmer. Vorteilhaft ist, dass beim elektrischen Bremsen, die Energie zurück gewonnen werden kann, außerdem ist kein Motorenölwechsel mehr nötig, daher besteht weniger Gefahr der Umweltverschmutzung durch Öl [79].

Im Anhang unter II.III. wird eine Umfrage bei potenziellen Nutzern in Deutschland aufgezeigt, wie sie die Elektroautos sehen und welches Potential Elektromobilität für sie hat. Beleuchtet wird unter anderem, dass gerade einmal 18% der Autofahrer zwischen 18 und 70 Jahren auf Autobahnen unterwegs sind, 34% fahren im Stadtverkehr und 42% auf Bundesstraßen [22]. Übers Jahr gesehen, legt ein durchschnittlicher PKW-Fahrer 80% der Tage weniger als 40 km zurück [16]. Dies zeigt auf, dass selbst die aktuell erzielbare Reichweite von Elektroautos für die Mehrzahl der Bevölkerung ausreichen würde. Auf die Reichweiten wird später im Punkt 2.5.1. eingegangen.

Autofahrer von heute wissen sehr wenig über Elektroautos, was die Umfrage aufzeigt. 61% der Befragten sind der Meinung, dass sie weniger wissen als der Durchschnitt und gerade einmal 9% denken viel darüber zu wissen. Dies veranschaulicht dass noch viel in Richtung Öffentlichkeitsarbeit getan werden muss [22].

---

<sup>5</sup> \_\_\_\_\_; Referenzwert kann durch Stand der Technik abgeleitet oder unternehmensintern als Zielwert festgelegt werden.

<sup>6</sup> \_\_\_\_\_.

### 2.2.2. Elektromobilität Heute

Ein umgebauter Audi A2 fuhr in der Nacht vom 25.Oktober 2010 mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 90 km/h in sieben Stunden die Strecke von München nach Berlin (605 km) ohne aufzuladen. Diese Marketingkampagne wurde von dem jungen Berliner Technologieunternehmen DBM Energy und dem Energieversorger Lekker Energie durchgeführt. Verwendet wurde ein Lithium-Eisen-Polymer-Akku. Diese Technologie befindet sich noch im Forschungsstadium und ist noch weit von einem Serieneinsatz entfernt, vor allem aus Gründen der Sicherheit und der Langlebigkeit. Diese Art Akku ist elektrisch und thermisch sehr instabil. [49]

In der nachfolgenden Abbildung ist die Anzahl der produzierten Elektrofahrzeuge für das Jahr 2009 dargestellt. Ersichtlich wird daraus, dass nur eine geringe Anzahl hergestellt wird. In Indien werden 1679 Stück, in Deutschland 722 Stück, in China 496 Stück und in Japan 458 Stück produziert. [Abb.5]

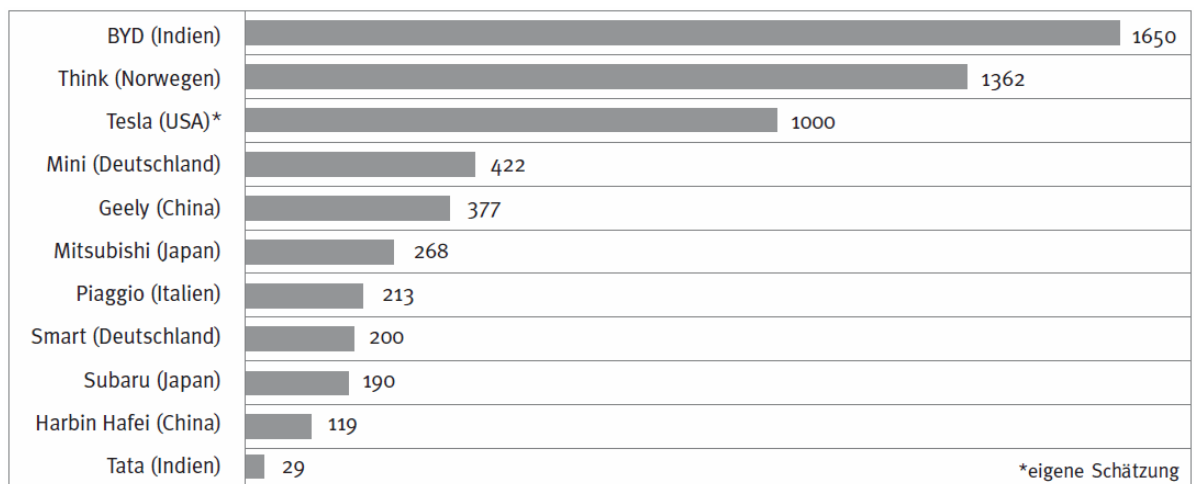


Abbildung 5: Produktion von Elektrofahrzeugen 2009  
Quelle: [16]

**Beispiele für Elektroautos:**

*Mitsubishi Colt MiEV*: kostet 40.000€, hat ein 200 kg schweres Batteriesystem, eine Energiedichte<sup>7</sup> von 109 Wh/kg, schafft eine Leistung von 47 kW / 64 PS und eine Reichweite von 144 km. Die Batterie allein kostet 14.000€ (speichert 16 kWh), so viel wie ein herkömmlicher Kleinwagen.

*Elektroportwagen Tesla Roadster*: kostet 100.000€, ein 450 kg schweres Batteriesystem (dies entspricht 6.831 Lithium-Ionen-Laptop-Akkus [61]), eine Energiedichte von 120 Wh/kg, schafft eine Reichweite von 350 km. Er hat eine Beschleunigung von 0 auf 100 km/h in nur vier Sekunden. Bei sportlicher Fahrweise kann jedoch schon nach 100 km Schluss sein.

Die oben gezeigten Beispiele untermauern die Notwendigkeit auf dem Gebiet der Elektromobilität zu forschen. Hier werden die minimalen Reichweiten, der zu hohe Preis und das große Gewicht der Batterie ersichtlich. Die Frage wie viel CO<sub>2</sub>-Emissionen Elektroautos tatsächlich verursachen, wird im nächsten Kapitel eingegangen.

**2.2.3. Energiebedarf**

Mit dem heutigen deutschen Kraftwerkpark beträgt der CO<sub>2</sub>-Ausstoß von Elektroautos bei einem Verbrauch von 18 kWh/100 km rund 115 g/km [22]. Ein Mittelklassewagen hat rund 140 g/km, in den kleineren Fahrzeugklassen liegen die CO<sub>2</sub>-Werte bereits heute schon unter 100 g/km. Bei Elektroautos wird der Ausstoß von der Energiegewinnung mit eingerechnet.

Die „Kraftstoffkosten“ für eine 100 km-Fahrt betragen rund 1,20 €. [27]

In der nächsten Grafik wird zwischen „Well to Tank“ und „Tank to Wheels“ unterschieden. „Tank to Wheels“ umfasst nur die Emissionen, die vom Fahrzeug ausgestoßen werden, bei einem Elektrofahrzeug sind die gleich Null. Bei „Well to Tank“ werden alle CO<sub>2</sub>-Emissionen addiert, die bis hin zum Tankvorgang entstehen. [16] [Abb.6]

---

<sup>7</sup> Die Energiemenge, die pro Masseneinheit oder pro Volumeneinheit gespeichert werden kann.

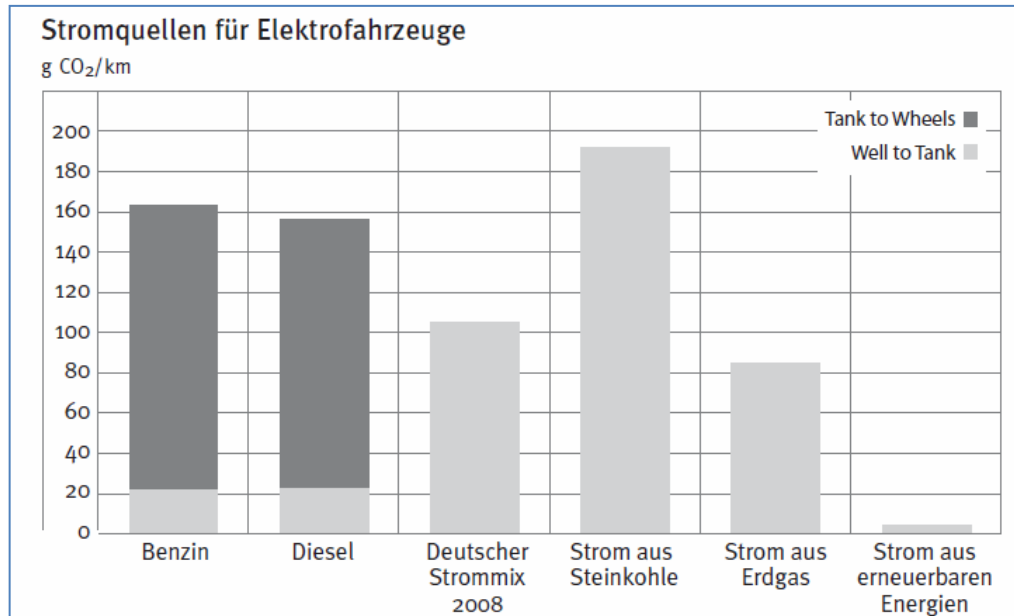


Abbildung 6: Stromquellen für Elektrofahrzeuge  
Quelle: [16]

Das Fraunhofer IAO hat in einem groben Beispiel errechnet wie hoch der Energiebedarf durch Elektrofahrzeuge ist [22]:

- Ausgangspunkt soll eine Stadt mit 100.000 Einwohnern sein.
- Da laut Statistischem Bundesamt jeder zweite Bürger in Deutschland ein Auto fährt, fahren in dieser Stadt circa 50.000 Autos.
- Ein fünfprozentiger Anteil von E-Fahrzeugen bedeutet, dass 2.500 Fahrzeuge elektrisch angetrieben werden.
- Weiterhin sei die Annahme getroffen, dass diese Stadt mit 100.000 Einwohnern einen Stromverbrauch von circa 500.000 MWh hat.
- Bei einer statistisch belegten, durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung von 15.000 km pro Pkw, einer Batteriereichweite von 200 km und einer Ladekapazität von 30 kWh verbraucht ein Elektrofahrzeug für 75 vollständige Ladevorgänge pro Jahr 2.250 kWh.
- Hochgerechnet auf 2.500 Fahrzeuge wären dies 5.625 MWh. Dies entspricht ungefähr einem Anteil von 1% am Gesamtenergiebedarf der Beispielstadt. Mit einem so gering zunehmenden Energiebedarf lassen sich für die Energieversorger nur bedingt zusätzliche Erlöse erzielen. So entspricht der angenommene Jahresverbrauch eines Elektrofahrzeugs von 2.250 kWh in etwa dem jährlichen Bedarf eines kleineren Familienhaushalts.



Damit Nullemissionsautos verwirklicht werden können, müsste der Strom nur aus erneuerbaren Energien gespeist werden, dann würde die Erzeugung Emissionen von höchstens 3 - 5 g/km verursachen [22]. Ein Problem das dadurch Auftritt ist: Was passiert wenn es windstill oder es bewölkt ist?

Eine Lösung dafür ist das Batteriewechselkonzept. Dieses Konzept und alle weiteren Ladekonzepte, wie das Normallade-, das Schnellladekonzept, die Induktionsladung und das E-Carsharing sind im Anhang unter II.IV. beschrieben. Um auf die Lithium-Ionen-Batterie einzugehen, werden die Eigenschaften von Lithium dargestellt. Ersichtlich wird dadurch, warum gerade an einer Lithium Batterie geforscht wird.

## **2.3. Lithium**

### **2.3.1. Eigenschaften**

Lithium hat im Periodensystem die Ordnungszahl 3 und mit einem Atomgewicht von 6,94 u ist es das leichteste Metall. Bei Raumtemperatur von 25 °C ist Lithium mit einer Dichte von 0,543 g/cm<sup>3</sup> der Feststoff mit der geringsten Dichte. Die Schmelztemperatur liegt bei 180 °C und der Siedepunkt ist bei 1372 °C. [26] Seine elektrische Leitfähigkeit beruht auf seiner kubisch-raumzentrierten Kristallstruktur [70].

Die Vorteile von Lithium sind:

- ungiftig
- hohe Energiedichte
- sehr leicht

In den Medien wurde einiges über den Ressourcenverbrauch von Lithium diskutiert, ob und wie lange er für Elektroautos ausreichen wird. Zur Übersicht kann man im Anhang unter Punkt II.V. das Vorkommen und unter II.VI. die Ressourcen von Lithium in der Welt nachlesen.

### **2.3.2. Anwendungsbereiche**

Lithium wird unter anderem für Aluminiumlegierungen im Flugzeugbau, in der Pharmazie zur Behandlung von Depressionen (Lithiumsalz), als Kathode und

als Leitsalz in Sekundärbatterien und in der Glas- und Keramikproduktion verwendet [137]. [Abb.7]

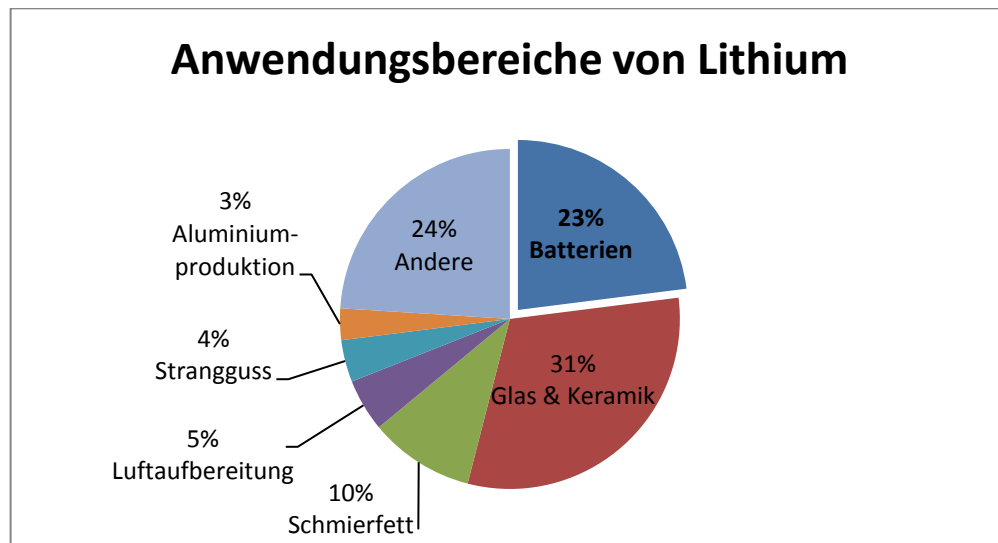


Abbildung 7: Anwendungsbereiche von Lithium  
Quelle: [137]

Wegen ihres geringen Gewichts werden Lithiumbatterien vorrangig für tragbare Geräte eingesetzt. Im Jahr 2007 machten Handys 47% des Lithium-Ionen-Batteriemarktes aus, Laptops 34%, Akku-Werkzeuge fünf Prozent und Digitalkameras vier Prozent. Der gesamte Lithium-Ionen-Batteriemarkt wuchs aufgrund des enormen Wachstums bei tragbaren Elektrogeräten in den Jahren 2000 - 2007 um 15% per anno. [29]

In naher Zukunft wird der Lithium-Verbrauch, durch den Einfluss von Elektro- und Hybridfahrzeugen, weiter drastisch wachsen.

Es gibt drei Varianten von Fahrzeugen, in denen Lithium-Ionen-Batterien verbaut werden:

**BEV** (Batterie-Electric-Vehicle): sind reine Elektroautos, die komplett nur mit Hilfe einer Batterie angetrieben werden.

**HEV** (Hybrid-Electric-Vehicle): Hybridfahrzeuge beziehen ihre Energie aus einem Verbrennungs- und einem Elektromotor.

**PHEV** (Plug-In- Hybrid-Electric-Vehicle): es ist ein Verbrennungs- und ein Elektromotor vorhanden, dazu kann die Batterie mit einem Stecker von außen aufgeladen werden.

Langfristig sind Hybridfahrzeuge durch ihre zwei Antriebssysteme zu komplex, zu schwer und zu ineffizient. Das ist ein weiterer Grund, warum man auf reine Elektroautos umsteigen will.

In Kapitel 2.4. wird zum besseren Verständnis der Batteriemarkt für Elektrofahrzeuge und deren Entwicklung in Deutschland beleuchtet.

## **2.4. Marktübersicht**

Eine Übersicht über Batteriehersteller für Elektrofahrzeuge und Forschungseinrichtungen auf diesem Gebiet ist im Anhang unter II.VII. in einer Deutschlandkarte dargestellt. Wie man erkennen kann, konzentrieren sich die meisten Firmen und Institute im Süden und Westen von Deutschland.

### **2.4.1. Entwicklung in Deutschland**

Bei der Anmeldung von Patenten zählt Japan bis heute zu den weltweit führenden Ländern im Bereich der Lithium-Ionen-Batterietechnologie. Unter den wichtigsten europäischen Akteuren ist Deutschland mit seinem Anteil von 4,8% an weltweiten Patentaktivitäten, vom Jahr 2005 - 2008, der Spitzenreiter. Angefangen hat Deutschland vom Jahr 1990 - 1994 mit 2,3%. [11]

Im Anhang unter II.VIII ist ein genaueres Kuchendiagramm mit weiteren Ländern, wie die USA, Kanada und Frankreich dargestellt.

Um neue Technologien auf dem Gebiet der Elektromobilität zu entwickeln haben sich viele deutsche Automobilhersteller und Zulieferer zusammengeschlossen und Joint Ventures<sup>8</sup> gegründet. Daimler und der Chemie- und Energiekonzern Evonik sind beispielhaft an dem Lithiumzellen-Hersteller Li-Tec in Kamenz (Sachsen) beteiligt und haben gemeinsam das Joint Venture „Deutsche Accumotive“ gegründet. Extra dazu hat Daimler Anteile am US-amerikanischen Sportelektrofahrzeugbauer Tesla Motors und kooperiert mit dem Joint Venture „Johnson Controls Saft“. [5]

---

<sup>8</sup> Unter einem Joint Venture versteht man eine gemeinsame Tochtergesellschaft von mindestens zwei rechtlich und wirtschaftlich getrennten Unternehmen.

Der VW-Konzern kooperiert mit den Batterieherstellern Sanyo (Japan) und Build Your Dreams (BYD, China). Zudem besteht eine Kooperation mit Varta Microbattery. [5]

Bosch hat mit Samsung SDI das Gemeinschaftsunternehmen SB LiMotive Co. Ltd. gegründet. Ziel des Unternehmens ist die Lithium-Ionen-Batterien für Anwendungen im Automobilbereich zu entwickeln, zu fertigen und zu vertreiben.

BMW setzt auf das Joint Venture „Johnson Controls Saft“, SB-LiMotive und auf Li-Tec. Dazu besteht eine Kooperation mit dem US-amerikanischen Zellhersteller A123. [5]

Continental besitzt eine Beteiligung am japanischen Batteriehersteller Enax [5]. Wie man sieht haben sich viele Firmen national, aber auch international (vor allem mit dem asiatischen Raum) zusammengeschlossen. Im nächsten Abschnitt soll aufgezeigt werden, welche Branchen noch mit einfließen und vom Wandel betroffen sind.

#### **2.4.2. Einfließende Branchen**

Weitere Märkte denen man Bedeutung schenken muss, ist zum Beispiel die Recyclingindustrie. Anwendbare Recyclingtechnologien und -anlagen sind in Deutschland nicht vorhanden und müssten erst entwickelt werden [5]. Die Pflicht zum Recyceln ist von der EU-Batteriedirektive 2006/66/EG „quantitative Recyclingeffizienz von mindestens 50% bei Lithium-Ionen-Batterien“ gefordert [84]. In Europa, zum Beispiel bei Umicore in Belgien oder Battrec in der Schweiz, werden Lithium-Ionen-Batterien zwar schon recycelt, aber eher um das darin enthaltene Kobalt zu gewinnen [29].

Um das Gesamt-System Elektromobilität zu entwickeln, müssen Fahrzeughersteller, Energieversorger und Informations- und Kommunikationstechnologien kooperieren. [Abb.8]

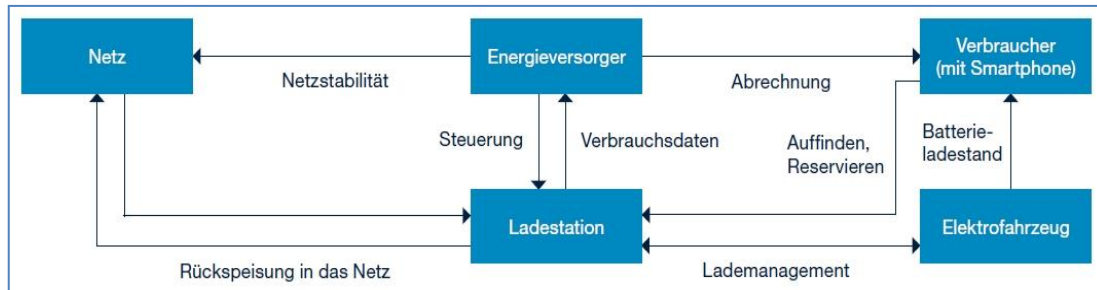


Abbildung 8: Gesamt-System Elektromobilität  
Quelle: [22]

Weiterhin bekommt die Informations- und Kommunikationstechnologie einen sehr hohen Stellenwert, da sie es ermöglicht, dass sich das Elektrofahrzeug mit seiner Umgebung und der Ladeinfrastruktur vernetzt. Alles wird elektrisch gesteuert. Ein intelligentes System muss den Energiefluss zwischen den Geräten bedarfsgerecht und effizient regeln, damit die eingesparte Energie in höhere Leistung oder Reichweite umgesetzt werden kann. Allein durch ein intelligentes Energiemanagement sind laut Experten noch bis zu 25% mehr Reichweite möglich. [22]

Eine weitere wichtige Branche ist die Energiebranche. Elektroautos müssen kostengünstig aufgeladen werden, dazu soll die Aufladung der Batterien in den frühen Morgenstunden geschehen, wenn nur wenige Verbraucher Strom benötigen und die Netzlast<sup>9</sup> sehr gering ist. [22] [Abb.9]



Abbildung 9: Gesamtstromverbrauch über den Tag  
Quelle: [22]

Benötigt wird eine intelligente Ladeinfrastruktur, einem sogenannten „Smart Grid“<sup>10</sup> und intelligente Abrechnungs- und Kommunikationssysteme „Smart

<sup>9</sup> Auch Netzbelastung genannt. Ist die Gesamtmenge des Stroms, der zu einem bestimmten Zeitpunkt von allen angeschlossenen Stromkunden verbraucht wird.

<sup>10</sup> Engl. „Intelligentes Energieversorgungssystem“.

Metering“<sup>11</sup>. Der Begriff „Smart Grid“ umfasst die Vernetzung und Steuerung von intelligenten Erzeugern, Speichern, Verbrauchern und Netzbetriebsmitteln in Energieübertragungs- und Verteilungsnetzen mit Hilfe von Informations- und Kommunikationssystemen. Ziel ist die umweltverträgliche und nachhaltige Sicherstellung der Energieversorgung. [22]

Batterien sollen das Stromnetz stabilisieren, bei kräftigem Wind und/oder starker Sonneneinstrahlung sollen sie die überschüssige Energie speichern und sie dann bei Flaute, zu einem gewissen Teil, wieder ins Netz einspeisen. Diese Technologie nennt sich „Vehicle to Grid“<sup>12</sup>, Strom fließt vom Elektroauto wieder zurück ins Stromnetz. [16]

Es muss also ein flächendeckendes Angebot von Ladestationen erarbeitet werden, damit die hohe Flexibilität nicht eingeschränkt wird. Dies lässt sich durch eine Mischung aus privaten und öffentlichen Ladestellen gewährleisten. Eine weitere Frage die sich stellt: Wer baut und betreibt die Ladesäulen, die Netzbetreiber oder die Energielieferanten? [22]

Beispielsweise hat Lapp Kabel in Kooperation mit Bals Elektrotechnik ein Ladesystem mit Kabel und Steckvorrichtung entwickelt. Die Anschlussleitung heißt ÖLFLEX CHARGE, das Spiralkabel ist flammwidrig, ölbeständig, halogenfrei und für einen Temperaturbereich von -40 °C bis +90 °C ausgelegt. Die komplette Steckvorrichtungsreihe enthält den Stecker, Kupplung, Anbaudose und Gerätestecker zur Fahrzeugeinspeisung. Über zwei zusätzliche Kontakte in der Steckvorrichtung erfolgt der Datenaustausch zwischen Fahrzeug und Energieversorgung. [17]

Ein einheitliches Lade-Steckersystem soll sicherstellen, dass die Kunden unabhängig von Automarke und Stromanbieter einen einfachen und direkten Zugang zum Energienetz haben. Dazu wurde ein modulares Stecksystem bestehend aus zwei Teilen beschlossen. Der Kern ist unter der Bezeichnung IEC 62196-2 Typ 2 zur Normierung für ein- bis dreiphasiges Laden mit Wechselspannung eingereicht. Eine Erweiterung für Gleichstrom ist noch in der Entwicklung und wird voraussichtlich 2013 realisiert. Das Leistungsspektrum reicht vom einpha-

---

<sup>11</sup> Engl. „Intelligente Dosierung“.

<sup>12</sup> Engl. „Fahrzeug zum Netz“.

sigen Laden an der Haushaltssteckdose über das dreiphasige Laden an privaten oder öffentlichen Fahrzeugladestationen. [17]

In diesem Kapitel wird ersichtlich, dass nicht nur allein die Automobilbranche und die Batterietechnologie von dem Wandel betroffen sind, auch andere Industriezweige werden berührt. Die größte Herausforderung ist wohl eine komplett neue Infrastruktur mit ausreichend Ladestationen zu erstellen.

Der nächste große Abschnitt beschäftigt sich mit Batterietypen, welche Reichweiten können sie erlangen, was für einen Wirkungsgrad besitzen sie und warum wird gerade an der Lithium-Ionen-Batterie geforscht.

## **2.5. Stand der Wissenschaft und Technik**

Dieses Kapitel geht konkret auf die Lithium-Ionen-Batterie ein. Der Aufbau, die Komponenten und der Herstellungsprozess werden dargestellt. Weiterhin werden Angaben zu den Elektrodenfolien und dem Separator gemacht und verschiedene Varianten des Kernprozesses -die Zellbildung- gegenübergestellt.

### **2.5.1. Batterietypen und Batteriekosten**

In der Tabelle 1 werden alle Batterietypen mit Energiedichte und Wirkungsgrad aufgezeigt. Ein Lithium-Ionen-Akkumulator besitzt eine Energiedichte zwischen 120 - 140 Wh/kg. Diese ist schon sehr hoch, wird aber von dem Lithium-Schwefel-Akkumulator übertroffen. Schwefel ist sehr widerspenstig, da es ein nichtleitendes, isolierendes Metall ist. Das ist der Grund warum die Elektronen oder Ionen nicht weit in einen Schwefelkörper eindringen können und nur Atome an dessen Oberfläche Lithium-Ionen binden. Ein Zwischenprodukt das sich bildet sind Polysulfide, diese können sich in dem flüssigen Elektrolyt auflösen, die sich dann im Inneren des Akkus ablagern und so das Laden und Entladen beeinträchtigen. Dieser Effekt führt dazu, dass schon nach wenigen Ladezyklen die Batterie defekt ist. [94]

Akkumulatortyp	Energiedichte Wh/kg	Wirkungsgrad	Besonderheit
Blei-Akkumulator	30	60–70 %	
Lithium-Ionen-Akkumulator	120–140	80 %	neuere Modelle schnellladefähig
Lithium-Polymer-Akkumulator	140	80 %	
Lithium-Titanat-Akkumulator	70–90	90–95 %	schnellladefähig
Lithium-Schwefel-Akkumulator	350	–	hohe Energiedichte
Natrium-Schwefel-Akkumulator	120	89 %	350 °C, keine Selbstentladung
Nickel-Cadmium-Akkumulator	40–60	70 %	EU-weit verboten
Nickel-Metallhydrid-Akkumulator	60–80	70 %	
Nickel-Wasserstoff-Akkumulator	75		
Zebra-Batterie (Natrium-Nickelchlorid-Akkumulator)	100–120	80–90 %	
Zum Vergleich: Dieseldieselkraftstoff	11.800	25 %	
Zum Vergleich: Superkraftstoff	12.000	15 %	

Tabelle 1: Batterietypen  
Quelle: [16]

In Abbildung 10 sind die verschiedenen Reichweiten von 125 kg schweren Blei-Säure-, Nickel Metall Hybrid- und Lithium-Ionen-Batterien gegenübergestellt. Mit einer Speicherkapazität von 25 kWh und 167 km Reichweite ist die Lithium-Ionen-Batterie um mehr als das doppelte besser als die Nickel Metall Hybrid Batterie. [86] [Abb.10]

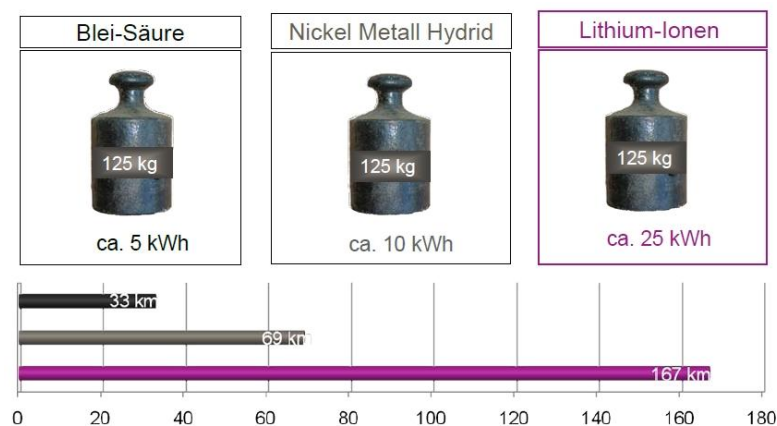


Abbildung 10: Reichweiten  
Quelle: [86]

Die heutigen Kosten von 1.000€ - 1.200€ pro Kilowattstunde Speicherkapazität liegen noch über den international formulierten Zielen. Für kleine Elektroautos, mit einer Reichweite von 100 km, fallen derzeit Batteriekosten von 10.000€ - 15.000€ an. Für den Massenmarkt gelten derzeit als akzeptabel



300€ - 500€ pro Kilowattstunde. [5] [Abb.11]<sup>13</sup>

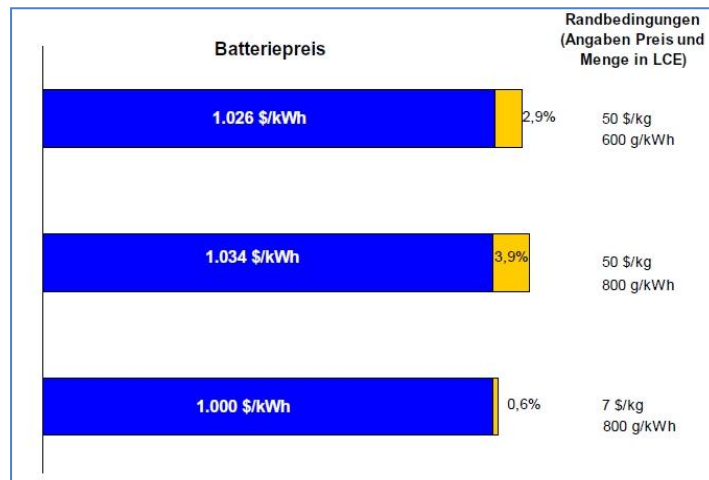


Abbildung 11: Batteriekosten  
Quelle: [30]

### 2.5.2. Lithium-Ionen-Batterie

Ein **Akkumulator** oder kurz Akku genannt, ist ein Speicher für elektrische Energie, meist auf Basis eines elektrochemischen Systems. Er besteht entweder aus einer oder mehreren wiederaufladbaren Sekundär-Zellen. Zur Erhöhung der Gesamtspannung werden sie in Reihe geschaltet. [82]

Die größten Nachteile von Elektrofahrzeugen gegenüber verbrennungsmotorgetriebenen PKW's sind derzeit, der zu hohe Preis und die Einschränkung der gewohnten Mobilität. Aufgrund der geringen Ladekapazität der Batterie ist die Reichweite begrenzt.

Die Leistungsreserven eines Elektrofahrzeugs sind geringer als bei einem PKW mit Verbrennungsmotor. Dies macht sich vor allem bei Bergfahrten oder bei Lasttransporten bemerkbar [5]. Die Batterien sind desweiteren noch zu groß und schwer. Deswegen ergibt sich die Notwendigkeit in Richtung Lithium-Ionen-Batterie zu forschen.

Die Vorteile einer Lithium-Ionen-Batterie sind [95]:

- thermisch stabil
- unterliegt keinem Memory-Effect (Kapazitätsverlust)
- konstante Spannung über den gesamten Entladezeitraum
- hohe Zyklenfestigkeit (möglichst viele Lade-/Entladevorgänge)
- hohe Energiedichte

<sup>13</sup> Lithium Ressourcen werden in LCE (Lithiumcarbonat-Äquivalente) angegeben, 5,32 kg LCE sind rund 1 kg Lithium.

Die Anforderungen an Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind sehr hoch. Eine höhere Energiedichte, eine längere zyklische<sup>14</sup> und kalendarische<sup>15</sup> Lebensdauer, sowie die Ladegeschwindigkeit und die Sicherheit sollen verbessert werden. Angestrebt wird auch, das Gewicht und die Kosten zu verringern. Die allgemein gewünschte Energiedichte von 200 Wh/kg bis 2015 bedeutet nahezu eine Verdopplung gegenüber heute verfügbaren Lithium-Ionen-Batterien [5].

Eine hohe Energiedichte erlaubt große Reichweiten, eine hohe Leistungsdichte dagegen eine schnelle Leistungsabgabe. Wegen der hohen Kosten sollte die Batterie bei einer Betriebsdauer von 10 - 15 Jahren mindestens 3.000 bis 5.000 Ladezyklen, ohne wesentliche Eigenschaftverschlechterung, aushalten. [5]

Enormen Einfluss auf die Alterung der Batterie hat die Temperatur einer Zelle. Die Betriebstemperatur liegt im Bereich von 65 °C bis 80 °C. Die unterschiedliche Alterung von Zellen in einem Verbund (kann zu einem verfrühten Ausfall des gesamten Energiepacks führen) lässt sich nur schwer durch ein Batteriemanagementsystem<sup>16</sup> abfangen. Das Batteriesystem ist mit einer Luft- oder Kühlmittelkonditionierung versehen, um eine Kühlung oder Umstände Beheizung der Batterie zu ermöglichen. Die angesaugte Luft muss entfeuchtet und von Partikeln befreit werden. Die Überschreitung der Temperaturgrenzen liefert Aktivierungsenergie für exotherme<sup>17</sup> Zersetzungsprozesse in der Zelle, die sich selbst beschleunigen und zum thermischen Durchgehen<sup>18</sup> der Zelle führen. Im schlimmsten Fall kann dies zu einer Explosion führen.

Auf Hinsicht des Prozesses soll dieser flexibel sein und sich an unterschiedliches Zelldesign anpassen können. Energieeffiziente Trockenräume sind bei der Produktion ein Muss.

Weiterentwicklungen des Li-Ionen-Akkus sind der Lithium-Polymer-Akku, der Lithium-Titanat-Akku, der SCiB (Super Charge Ion Battery), der Lithium-Mangan-Akkumulator und der Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulator.

---

<sup>14</sup> Gibt an wie viele Lade- und Entladezyklen eine Batterie aushält.

<sup>15</sup> Gibt die zeitliche (Tage, Monate, Jahre) Lebensdauer einer Batterie an. Limitierende Faktoren sind Verschleiß, Zersetzungs- und Verdunstungseffekte.

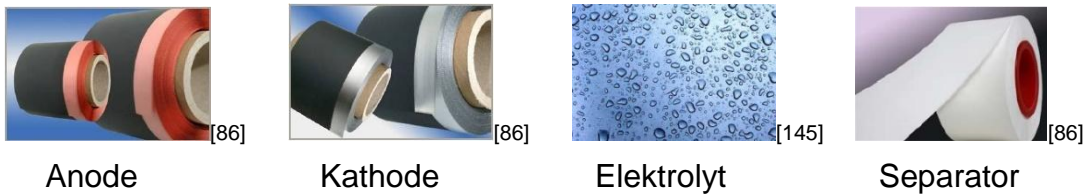
<sup>16</sup> Verantwortlich für die Lade- und Entladesteuerung, Temperaturüberwachung, Reichweitenabschätzung und Diagnose.

<sup>17</sup> Griech. Hitze erzeugend. Chemische Reaktion bei der Energie (Wärme) freigesetzt wird.

<sup>18</sup> Thermisches Durchgehen bezeichnet die Überhitzung einer exothermen elektrochemischen Reaktion, so dass noch mehr Hitze entsteht und die frei werdende Wärmeenergie nicht mehr rechtzeitig abgeführt werden kann. Die Folge einer solchen Kettenreaktion ist Rauch- und Flammenbildung bzw. eine Explosion.

### 2.5.2.1. Aufbau

Eine Lithium-Ionen-Batterie besteht aus vier Komponenten:



Separator – Kathode – Separator – Anode – Separator werden kontinuierlich übereinander gestapelt. [Abb.12]

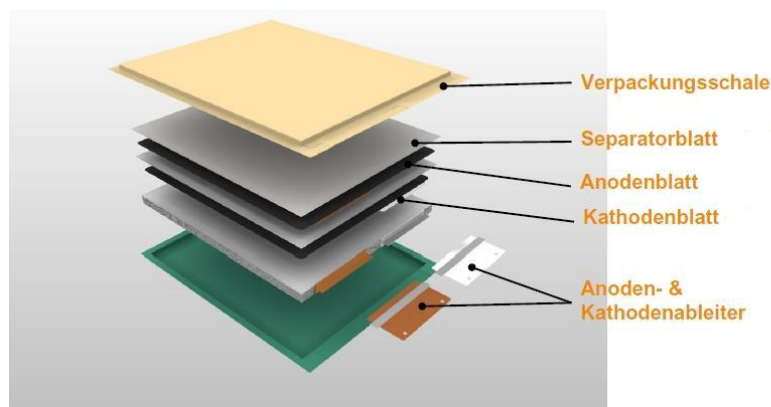


Abbildung 12: Aufbau  
Quelle: [86]

### Angaben zur Separatorfolie

Separatoren bestehen aus semipermeablen<sup>19</sup> Keramik-Membranen. Ihre Aufgabe besteht darin Anode und Kathode im Akku zu trennen, um Kurzschlüsse zu verhindern.

Evonik hat einen keramischen Separator -SEPARION- entwickelt, welcher eine höhere Sicherheit gegen Überhitzung bietet und eine daraus folgende Explosionsgefahr. Herkömmlich gebaute Lithium-Ionen-Batterien schmelzen ab 140 °C, mit dem neuen Separator liegt die Schmelzgrenze der Batterien bei 700 °C. Zusätzlich sollen dadurch die Batterien eine längere Lebensdauer erhalten. Die Separion-Membran besteht aus einer Polymermatrix, die auf beiden Seiten keramisch beschichtet und trotzdem flexibel ist. [85]

Die Oberfläche ist weiß. Der Separator wird auf Rollen angeliefert und so ist die Blattlänge endlos. Nähere Angaben finden Sie im Anhang unter II.VIX.

<sup>19</sup> „halbdurchlässig“ oder „teilweise durchlässig“. Membran lässt das Lösungsmittel, aber nicht den gelösten Stoff durch.

### Angaben zur beschichteten Kathodenfolie

Die Kathode gibt Elektronen ab, die Kationen (+) wandern zur Kathode. Bei einem elektrischen Erzeuger für Gleichspannung besitzt die Kathode eine positive Polarität. Das Kathodenmaterial ist eine beidseitig beschichtete Aluminiumfolie. Das Aktivmaterial kann  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$ ,  $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$ ,  $\text{LiNi}_{0,85}\text{Co}_{0,1}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$ ,  $\text{LiNi}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , oder ein Lithium-Eisen-Phosphat  $\text{LiFePO}_4$  sein. [87] In dieser Arbeit wird als Aktivmaterial ein Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Dioxid oder kurz  $\text{LiNiMnCoO}_2$  verwendet.

Das Ableiterfährnchen besteht aus Aluminium. Dieses wird aus dem unbeschichteten Randstück der Elektrode ausgeschnitten. Die Oberfläche der Beschichtung ist matt und schwarz, das Ableiterfährnchen ist silbern/grau und glänzend. Weitere Angaben befinden sich im Anhang unter II.X.

### Angaben zur beschichteten Anodenfolie

Die Anode ist die Gegenelektrode zur Kathode und nimmt Elektronen auf. Anionen (-) wandern zur Anode, sie besitzt eine negative Polarität.

Das Anodenmaterial ist eine beidseitig beschichtete Kupferfolie. Das Aktivmaterial kann aus Graphit, einem nanokristallinen amorphen Silizium, Lithium-Titanat ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ) oder Zinndioxid ( $\text{SnO}_2$ ) bestehen. [87]

In dieser Arbeit wird als Aktivmaterial Graphit benutzt. Das Ableiterfährnchen besteht aus Kupfer. Dieses wird aus dem unbeschichteten Randstück der Elektrode ausgeschnitten.

Die Oberfläche der Beschichtung ist matt und schwarz, das Ableiterfährnchen ist bronzefarben und glänzend. Weitere Angaben sind im Anhang unter II.XI. nachzulesen.

## Angaben zum Elektrolyt

Ein Elektrolyt ist ein fester oder flüssiger Leiter für elektrischen Strom, wobei der Ladungstransport durch die Bewegung von Ionen erfolgt. Er übernimmt den Stromtransport zwischen den Elektroden.

Die meisten Elektrolyte sind flüssig, in dieser Arbeit wird ein Leitsalz Lithium-Hexafluorophosphat oder kurz  $\text{LiPF}_6$  verwendet. Festelektrolyte werden zur Erzeugung von Ionen bei höheren Temperaturen eingesetzt, wie beim Lithium-Polymer-Akkumulator. Da Lithium heftig mit Wasser reagiert, werden organische Lösungsmittel eingesetzt, die wasserfrei und brennbar sind. [87]

### 2.5.2.2. Funktion

In der Batterie erfolgt ein Austausch von Lithium-Ionen. Bei der Entladung transportiert der Elektrolyt die Lithium-Ionen ( $\text{Li}^+$ ) von der negativen Elektrode (Anode) zur positiven Elektrode (Kathode). Dabei wird elektrische Energie freigesetzt. Während des Ladens kehrt sich der Strom der Lithium-Ionen um und sie werden von der Kathode durch den Elektrolyten zurück zur Anode übertragen.

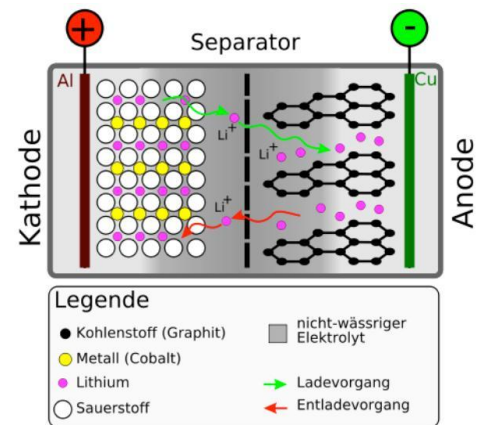


Abbildung 13: Funktion  
Quelle: [141]

Dank der porösen Struktur des Separators können die Lithium-Ionen passieren. Der Separator ist für die  $\text{Li}^+$ -Ionen durchlässig, jedoch für das Lösungsmittel undurchlässig. [41] [Abb.13]

### Reaktionsgleichung bei der Entladung [71]:

Negative Elektrode / Oxidation:  $\text{Li}_x\text{C}_n \rightarrow \text{C}_n + x \text{Li}^+ + x \text{e}^-$

Positive Elektrode / Reduktion:  $\text{Li}_{x-y}(\text{MnO}_2)_x + y \text{Li}^+ + y \text{e}^- \rightarrow x \text{LiMnO}_2$

Der Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie galt als Übersicht zum besseren Verständnis. Der nächste Abschnitt beschäftigt sich nun mit der Herstellung der Zellen.

### 2.5.3. Herstellungsprozess der Lithium-Ionen-Zellen

Der Prozessablauf für die Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen kann in acht Phasen eingeteilt werden. In der ersten Phase wird das Trägermaterial mit dem Anoden- beziehungsweise mit dem Kathodenmaterial beschichtet. Danach werden die Kupferfolie (Anode) und die Aluminiumfolie (Kathode) kalandriert<sup>20</sup>. Die nächsten Schritte laufen in einem Trockenraum ab, in dem eine relative Luftfeuchte von  $< 1\%$  herrscht, da die Komponenten einer Lithium-Batterie extrem feuchtigkeitsempfindlich sind. Erst wenn eine Batterie versiegelt ist, darf sie den Trockenraum verlassen.

Im zweiten Schritt wird die Anoden- und die Kathodenfolie auf einer Walze bereitgestellt. Dazu wird der Separator angeliefert und das flexible Keramikvlies ebenso auf einer Walze bereitgestellt.

Im dritten Prozessschritt wird die Anoden- und Kathodenfolie mit einem Laser in etwa DIN A5 große Stücke zugeschnitten. In bisherigen Verfahren wurden die Ausgangsmaterialien ausgestanzt, durch die Messerabnutzung kann keine gleichbleibende Schnittqualität garantiert werden.

In der nächsten Phase werden die drei Materialien durch verschiedene Verfahren zusammengebracht und gestapelt, diese werden näher im Abschnitt 2.5.4. erläutert.

Im fünften Schritt werden die Stapel durch aufbringen eines Klebestoffes fixiert und dann versiegelt, der Verbund kann nun den Trockenraum verlassen.

In einem weiteren Schritt wird das Fügen der Ableiter vorgenommen. Danach kommt der Verbund in eine besondere Hülle und wird mit dem Elektrolyt befüllt. Die letzte und achte Phase ist die Endprüfung. [Abb.14]

Die Prozesskette wird im Anhang unter II.XII. demonstriert.

---

<sup>20</sup> Kalandrieren wird zur Herstellung von Folien eingesetzt. Ein Kalandrier besteht aus mindestens zwei beheizten Walzen, die parallel angeordnet sind und gegensinnig laufen. Das zu bearbeitende Material wird beheizt und läuft dann durch die Spalten der Walzen hindurch und übergibt diese dann zu den nächsten Walzen, so kann die Dicke reduziert werden.

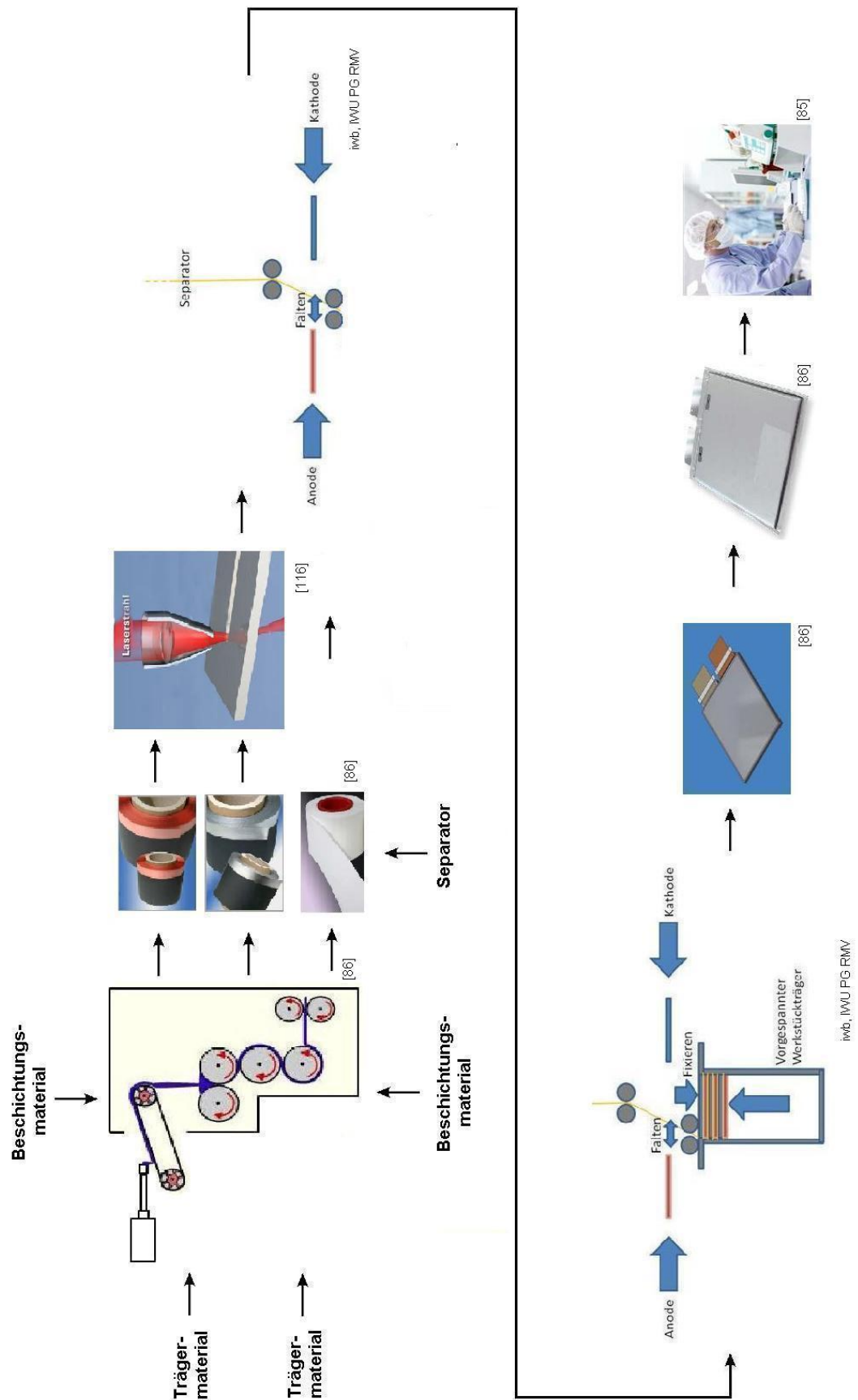


Abbildung 14: Prozessablauf

### 2.5.4. Kernprozess / Zellbildung

Um die drei Komponenten Aluminiumfolie, Kupferfolie und Separator zu einem Verbund zusammenzuführen und zu fixieren gibt es drei verschiedene Techniken. Die verschiedenen Verfahren sind Flachwickeln, Falten oder Stapeln. Diese werden in den nachfolgenden Kapiteln erklärt.

Auf diesem Gebiet gibt es noch großen Forschungsbedarf, da dieser Prozessabschnitt ausschlaggebend für die Qualität der Zelle ist. Wichtig ist, dass ein starker Grat an den Kanten beim Laserschnitt vermieden wird. Der Prozess soll eine relativ hohe Geschwindigkeit ermöglichen und stabil gegen Störungen sein. Weiterhin dürfen die Elektroden und der Separator nicht beschädigt werden.

#### 2.5.4.1. Flachwickeln

Die Ausgangsmaterialien werden als Rollenware in der Reihenfolge Separator-Anode-Separator-Kathode auf einen Wickeldorn aufgespannt. In einer kreisförmigen Bewegung werden die Bahnen kontinuierlich um den Wickeldorn gespannt. Nach etwa 20 Lagen wird die Wickelbewegung angehalten und die Bahnen werden an einer definierten Stelle getrennt. Nachdem das Paket fertig gewickelt wurde, wird es endfixiert. Anschließend wird der Wickeldorn herausgelöst, der Wickel ausgeschleust und dem Folgeprozess zugeführt. Der Wickelverbund wird dann gepresst. [Abb.15]

Das genaue Aufwickeln und das dabei genaue Führen der Bahnen gelten als kritisch. Weiterer Kritikpunkt ist der Wickeldorn. Das Herauslösen ist sehr heikel, da die Gefahr besteht, dass aufgewickelte Bahnen mit herausgezogen werden. Der Schwerpunkt ist jedoch, das anschließende Verpressen danach, da hierbei die Beschichtung an den Knickungen abplatzt kann. Der Wickeldorn kann auch enthalten bleiben, was sich jedoch negativ auf den Platzbedarf und damit auch auf die Energieleistungsdichte der Gesamtbatterie auswirkt. Weiterhin ist das Spannen der Materialbahn notwendig, wodurch Zugkräfte auf die Bahnen wirken. Der Prozess ist dazu sehr störanfällig, da keine Magazinierung möglich ist und alle Komponenten voneinander abhängig sind. Problematisch



ist auch, dass detektierte Fehlstellen nicht vorher weggeschnitten werden können. Sie werden also mitverarbeitet und das führt zu einem hohen Ausschuss, der ganze Verbund müsste entsorgt werden.

Vorteil ist, dass durch das kontinuierliche Aufwickeln ein schneller Prozess ermöglicht wird. Die Folien werden nur einmal geschnitten, weshalb nur wenige scharfe Kanten entstehen können. Das Know-how für dieses Verfahren könnte man sich bei der Papierindustrie einholen.

Eine detaillierte Prozessdarstellung ist im Anhang unter II.XIII. dargestellt.

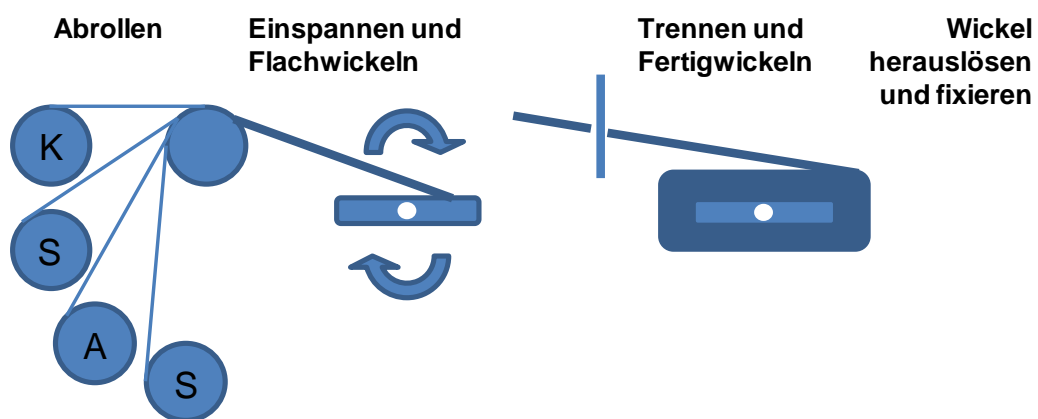


Abbildung 15: Flachwickeln  
Quelle: iwv, IWU PG RMV

#### 2.5.4.2. Stapeln

Die Ausgangsmaterialien werden von der Rollenware abgewickelt und anschließend per Laser in DIN A5 große Stücke zugeschnitten. Die geschnittenen Folien werden abtransportiert und für die Stapelung bereitgestellt. Eine Magazinierung ist hier möglich und dies macht den Gesamtprozess flexibler und resistenter gegen Störungen. Die Folien werden abgehoben, ausgerichtet und schichtweise auf einem Stapel abgelegt. Dabei wird die Stapelreihenfolge Separator-Anode-Separator-Kathode kontinuierlich fortgesetzt. [Abb.16]

Dieses Verfahren wird in der Industrie oft angewendet. Die Nachteile sind, dass bei diesem Verfahren durch den Laserschnitt ein scharfer Grat an den Kanten der Blätter entsteht, die später den Separator beschädigen könnten. Weiterhin ist die Handhabung des Separators sehr kritisch. Durch elektrostatische Aufladung ist eine Vereinzelung der Blätter aus dem Stapel nicht gewährleistet, so

dass oft mehrere Blätter aufgenommen werden, die unterwegs teilweise herunterfallen oder mit in den Stapel eingebracht werden. Der Prozess ist wegen der vielen Handhabungen langsam, dafür wirken keine Zugkräfte auf ihn, wie zum Beispiel beim Wickeln.

Der Vorteil ist, dass dieses Verfahren wenig stör anfällig ist, gerade durch die Magazinierung. Der größte Vorteil ist unter anderem, dass der Prozess schon bekannt ist und Erfahrungen vorliegen. Desweiteren können Fehlerstellen und Verunreinigungen durch eine Zuschnitts-Steuerung gezielt ausgespart werden, um den Ausschuss zu verringern.

Eine detaillierte Prozessdarstellung ist im Anhang unter II.XIV. dargestellt.

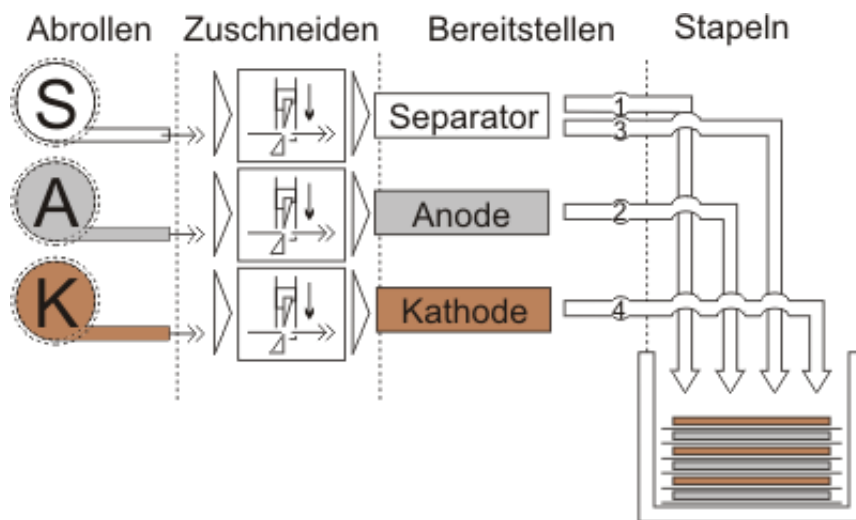


Abbildung 16: Stapeln  
Quelle: *iwb*, IWU PG RMV

### 2.5.4.3. Falten

Die drei Folien laufen in der richtigen Reihenfolge übereinander und werden dann zusammen Z-artig gefaltet.

An den Faltungen knicken die Folien und die Beschichtung platzt ab. Die abgeplatzten Beschichtungspartikel könnten dann den Separator durchstoßen. Damit würden sich die beiden Elektroden berühren und es würde zu einem Kurzschluss führen.

Vorteil ist ein schneller Prozess und das der Separator einfacher gehandhabt werden kann.

Um die Vorteile des Stapelns und des Faltens zu verbinden, hat das *iwb* andere Verfahrensmöglichkeiten weiterentwickelt. Zum Einen ist das die Separator-Z-Faltung und zum Anderen die Laminier-Z-Faltung. Diese zwei innovativen Verfahren werden in den nachstehenden Abschnitten erklärt.

Kriterien waren die schwierige Handhabung von den Separatorblättern und die Vermeidung von Beschichtungsabplatzungen bei den Elektroden. Deswegen wird der Separator nicht geschnitten und transportiert, sondern gefaltet. Er besteht aus einem flexiblen Vlies, insofern ist eine Faltung bei ihm nicht sehr kritisch, ihm widerfährt nur eine geringe Beeinträchtigung durch das Knicken.

Bei den Elektroden ist die Handhabung kein Problem, dafür das Knicken. Daher werden sie in Blätter geschnitten und anschließend im Faltprozess des Separators eingelegt.

#### 2.5.4.3.1. Laminier-Z-Faltung

Einzelne, in einem vorhergehenden Prozess zugeschnittene Elektroden werden jeweils gegenüberliegend in definierten Abständen auf den kontinuierlich zugeführten Separator auflaminiert. Vorgesehen wird ein kontinuierliches Auftragen zwei dünner Linien eines Klebstoffes, um dann die Elektrodenfolien aufzuwalzen oder aufzulegen. Nachdem ein Z-Verbund aus circa 20 Einzelzellen aufgefaltet wurde, lässt sich der Separator an einer nicht laminierten Stelle mittels Laserschneiden durchtrennen. Der Prozess läuft teil-kontinuierlich. [Abb.17]

Durch die Verwendung von Klebstoff entstehen Bauteilverunreinigungen. Hinzu kommt, dass der Separator mit den Elektroden belastet wird.

Eine detaillierte Prozessdarstellung ist im Anhang unter II.XV. dargestellt.

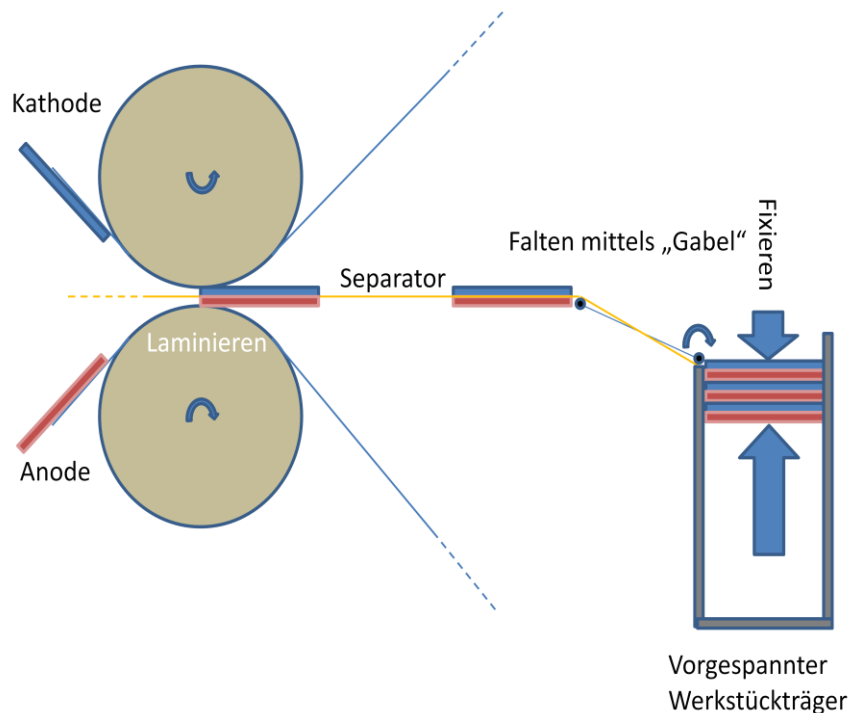


Abbildung 17: Laminier-Z-Faltung  
Quelle: iwv, IWU PG RMV

#### 2.5.4.3.2. Separator-Z-Faltung

Die Separator-Z-Faltung ist eine Mischung aus den beiden Verfahren Stapeln und Falten. Die Elektroden werden zugeschnitten und als Einzelzuschnitte dann alternierend dem Separator zugeführt, der Z-artig gefaltet wird. Der Separator besteht aus einem flexiblen Vlies. Durch eine dünnere Beschichtung als bei den Elektroden sind die abplatzenden Partikel durch die Faltung kleiner.

Nachdem ein Z-Verbund aus circa 20 Einzelzellen aufgefaltet wurde, wird der Separator mittels Laserschneiden oder eventuell mittels eines Messers durchtrennt. [Abb.18]

Dieser Prozess ist ähnlich dem des Stapelns und dem des Falten, deswegen ist er recht beherrschbar im Gegensatz zu dem der Laminier-Z-Faltung.

Eine detaillierte Prozessdarstellung ist im Anhang unter II.XVI. abgebildet.

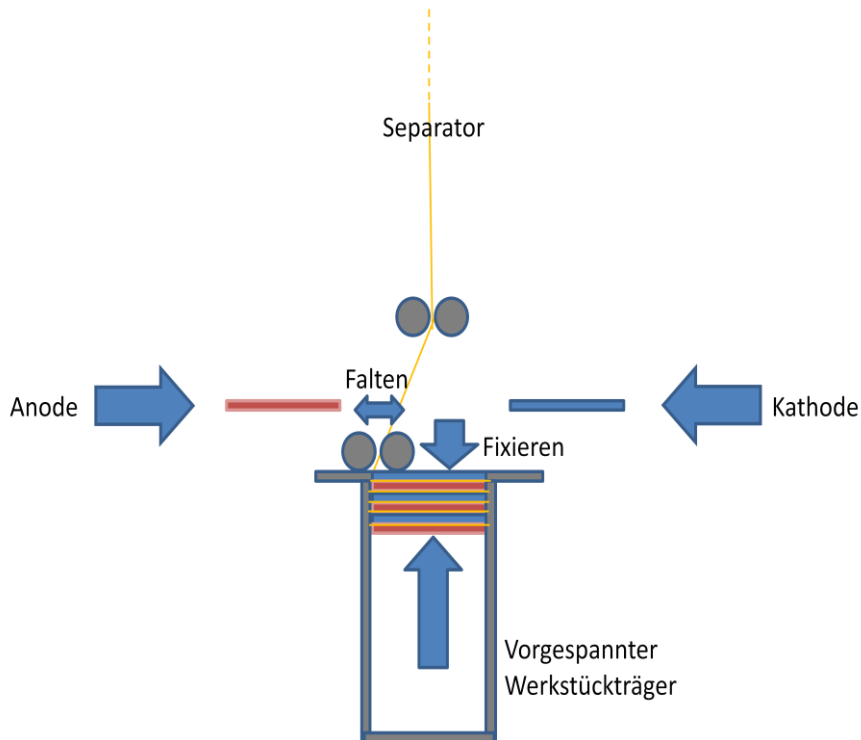


Abbildung 18: Separator-Z-Faltung  
Quelle: *ivb*, IWU PG RMV

Um einen innovativen, leistungsfähigen, aber auch realisierbaren Prozess für das Demonstrationszentrum auszuwählen, wurden alle möglichen Verfahren eingehend bezüglich definierter Kriterien untersucht. Bei der Durchführung einer gewichteten Punktbewertung, welche im Anhang unter II.XVII. ersichtlich ist, stellte sich heraus, dass das Verfahren „Separator-Z-Faltung“ das größte Potential besitzt. Er ist beherrschbar, genügend Forschungspotential ist vorhanden und alle Vorteile von dem des Stapelns und dem des Faltens werden vereint. Deswegen wird die Separator-Z-Faltung im Demonstrationszentrum in Garching umgesetzt.

Der gesamte Herstellungsprozess muss nun auf eventuelle Einflussfaktoren untersucht werden. Geeignete Prüfverfahren und Qualitätssicherungssysteme würden dann die Einflussfaktoren überprüfen und somit die Qualität der Zelle sicher stellen. Tiefer eingegangen wird hierauf im nächsten Abschnitt.

### **3. Qualitätssicherung im Aufbau der Li-Ionen-Zellverbund-Einheiten**

Die Qualitätssicherung umfasst alle geplanten und systematischen Tätigkeiten, die ausgeführt werden, um eine Qualitätsanforderung zu erfüllen. [126]

Für Elektrofahrzeuge gelten die gleichen Sicherheitsanforderungen, wie für konventionelle Fahrzeuge, sie müssen vor allem Crashesicher sein. [76]

Um dies zu gewähren, muss eine einwandfreie Batterie den Herstellungsprozess verlassen. Wiederum das dies gewährleistet werden kann, müssen alle möglichen Einflussfaktoren auf den Prozess und auf das Produkt durch geeignete Prüfverfahren und Qualitätssicherungssysteme überprüft und abgesichert werden. Mit all diesen Themen beschäftigt sich das folgende Kapitel, alle Einflussfaktoren werden aufgelistet und einige Qualitätssicherungsmaßnahmen vorgestellt.

#### **3.1. Qualitätsrelevante Merkmale für die Prozessqualität**

Für einen sicheren Prozessablauf ist der Trockenraum ein sehr wichtiger Bestandteil. Die Luftfeuchte und die Temperatur müssen stetig gemessen und überprüft werden. Die Trockenleistung ist für 3 Personen im Raum ausgelegt. Diese Anzahl an Personen darf nicht überschritten werden, da sonst Feuchte in den Zellstapel gelangen kann.

Bei der Zuführung der Träger- und Beschichtungsmaterialien ist eine konstante Geschwindigkeit und Bahnspannung einzuhalten, da die Folien sonst reißen oder durchhängen, dafür ist die Bahnspannungsregelung zuständig. Die Bahnkantensteuerung dagegen regelt die genaue Einhaltung der genau definierten Laufbahn der Folien.

Beim Laser muss auf die Laserleistung, den Spotdurchmesser und auf den Laservorschub geachtet werden. Metallfolien leiten sehr gut Wärme. Durch unnötige Strahlleistung wäre die Wärmeeinflusszone sehr groß und die Folien könnten sich verziehen. Weiterhin muss die Schnittgeschwindigkeit optimal einge-

stellt werden, da sonst unnötige scharfe Kanten entstehen. Zu beachten ist auch der Einstrahlwinkel und der Fokus des Laserstrahls.

Prozess	Einflussfaktoren
Trockenraum	Luftfeuchte Temperatur
Zuführung der Träger- und Beschichtungsmaterialien	Bahnspannung Lage der Folien
Laserzuschnitt	Laserleistung Spotdurchmesser Laservorschub Einstrahlwinkel Fokus des Laserstrahls

Tabelle 2: Prozessqualität

Im Anhang unter III.I. sind die Einflussfaktoren ausführlicher in den acht Prozessschritten dargestellt.

Übergegangen wird nun auf die Einflussfaktoren, die im Prozess auf den Zellstapel wirken.

### 3.2. Qualitätsrelevante Merkmale für die Produktqualität

Einfluss auf die Qualität des Produktes nimmt die Auftragsdicke, die Homogenität und die Haftung der Beschichtung. Sinnvoll ist eine Eingangsprüfung, während die Rollen abgewickelt werden, um auszuschließen das Risse, Dellen oder Partikel, durch den Transport in den Prozess eingeschleust werden.

Durch das Zuschneiden der Elektroden mit dem Laser ist es sehr wahrscheinlich, dass Spritzer auf die Oberfläche gelangen, welche die Oberfläche verunreinigen. Am Rand der Folien ist es möglich, dass eine Delamination auftritt beziehungsweise die Beschichtung abplatzt. An den Kanten ist weiterhin der Schnittgrat wichtig, da ein zu starker Grat an den Kanten später den Separator durchstechen könnten.

Metall leitet sehr gut Wärme, darum muss der Wärmeeinflusszone Beachtung geschenkt werden. Ist sie durch die Lasereinwirkung zu groß, verzieht sich die Form und die Geometrie der Blätter.

Bei der Handhabung der Stapelzuschnitte ist es denkbar die Oberfläche zu beschädigen. Die Positionierung der Zuschnitte beim Ablegen auf den Stapel ist ein weiterer kritischer Punkt. Die Blätter müssen vereinzelt sein, die untersten

Schichten dürfen sich nicht verschieben und die Reihenfolge muss eingehalten werden.

Weiterhin wirken bei der Fixierung des Stapels Prozesskräfte auf den Verbund, die man abwägen beziehungsweise messen sollte. Ebenso könnten die Kanten durch das Aufbringen des Tapes beschädigt werden, was die Qualität der Lithium-Ionen-Zelle verschlechtert.

Zu beachten ist, dass der mechanische und elektrische Kontakt beim fügen der Ableiter hergestellt sein muss.

<b>Produkt</b>	<b>Einflussfaktoren</b>
Beschichtung/ Rollenware	Beschichtungsdicke Homogenität Haftung Risse, Dellen, Partikel
Laserschnitt	Spritzer Scharfe Kanten Wärmeeinflusszone
Handhabung der Stapelzuschnitte	Beschädigung der Oberfläche Positionierung Reihenfolge
Fixierung des Zellstapels	Prozesskräfte Kantenbeschädigung
Ableiter fügen	Mechanischer und elektrischer Kontakt

Tabelle 3: Produktqualität

Im Anhang unter III.I sind alle Einflussfaktoren für den Prozess und für das Produkt detaillierter in Tabellen dargestellt.

Den größten Einfluss auf die Qualität der Zelle haben die kritischen Faktoren. Kritischen Faktoren, die während der Zellstapelung, dem Elektroden und Separator Zuschnitt auftreten könnten, werden in der Tabelle 14 im Punkt III.I. aufgezeigt.



Bei Expertengesprächen mit unserem Partner Li-Tech, welcher schon auf einschlägige Erfahrungen zurückgreifen kann und bei der Erstellung einer Gewichtungsmatrix (Anhang Punkt III.II. ) stellte sich heraus, dass es vier Hauptkritische Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Prozesskette gibt, auf die Augenmerk gelegt werden sollte.

Diese sind:

- die Partikelerkennung
- die Randtopographie beim Schneiden
- das zerstörungsfreie Prüfen der Ableiterfährchen
- die Feuchtigkeitsmessung

Wie man in der Gewichtungsmatrix im Anhang erkennen kann, werden fast alle kritischen Einflüsse mit diesen vier Absicherungsmaßnahmen geprüft. Die Überprüfung der Beschichtungsdicke und die Haftung der Beschichtung fällt in den Aufgabenbereich des Fraunhofer IWS. Diese Qualitätssicherungsmaßnahmen werden aktuell in der Industrie kaum bis gar nicht umgesetzt. Es gibt trotzdem weitere kritische Probleme, die man nicht außer Acht lassen darf, wie zum Beispiel die Bahnkantensteuerung, da ohne sie kein einziger Verbund entstehen würde. Hier besteht aber kein dringender Forschungsbedarf, da schon ausgereifte Techniken auf dem Markt existieren. Diese könnten einfach eingekauft beziehungsweise vom Anlagenbauer gleich integriert werden. Vieles kann aus der Industrie für Papier- und Folienherstellung übernommen werden. Ein weiteres Beispiel ist die Überprüfung der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit im Trockenraum, auch hierfür gibt es ausgereifte Sensoren. Für die Temperatur gibt es Temperatursensoren und für die Luftfeuchtigkeit Feuchtesensoren, diese müssten nur eingekauft und in den Prozess integriert werden. Erwähnenswert ist noch das kameragestützte Positionierungssystem, da ohne ihn auch kein funktionstüchtiger Verbund entstehen würde. Die Kamera nimmt ein Bild auf, das aufgenommene Bild wird dann durch ein Bildverarbeitungssystem geschickt, dabei werden die Daten digitalisiert und auf wesentliche Prüfmerkmale untersucht. Die Ergebnisse werden interpretiert und an ein Handhabungssystem weitergeleitet, dieses reagiert dann und positioniert das Objekt innerhalb der Toleranzen. [72]

Im Anhang unter der Tabelle 19, wird eine Übersicht über verschiedene Sensoren mit deren Funktionen gegeben. Viele werden für Positionierungssysteme verwendet oder zur Messung von Füllständen. Die Füllstandssensoren finden bei der Befüllung der Hülle mit Elektrolyt Verwendung.

Auf die oben genannten Qualitätssicherungsmaßnahmen wird in den nächsten Kapiteln näher eingegangen.

### 3.3. Feuchtigkeitsmessung

Bei der Feuchtemessung von Festkörpern wird meistens die relative Feuchte<sup>21</sup> bestimmt. Feuchte kann durch die Rollen in den Trockenraum eingebracht werden oder wenn die Anzahl von 3 Personen im Raum überschritten wird. Der Lithium-Ionen-Akkumulator muss komplett wasserfrei sein, da sonst das Wasser mit dem Leitsalz ( $\text{LiPF}_6$ ) zu Flusssäure (HF) reagiert.

Es wird zwischen direkten und indirekten Messverfahren unterschieden. Die direkten Materialfeuchtemessverfahren geben Aussage zum Wasseranteil im Messgut, sie sind aber kaum online einsetzbar.

Die indirekten Materialfeuchtemessverfahren geben Aussage zu Feuchteigenschaften des Messgutes, sie sind online einsetzbar, müssten jedoch kalibriert werden.

Mögliche Verfahren, um die Feuchte zu messen, sind im Anhang unter III.III. abgebildet. Eingegangen wird extra noch einmal auf Online-Messverfahren, da dies ein Kriterium hierbei ist.

Kriterien sind, dass eine Online-Messung möglich ist und die Feuchte berührungslos gemessen wird. Schwerpunkt ist hier, dass die Elektroden metallisch sind und eine gute Leitfähigkeit besitzen. Einige Messverfahren werden für die Elektroden ausscheiden, aber für den Separator sind sie dennoch denkbar, da er aus einem keramischen Vlies besteht.

Sieben Messmethoden wurden wegen diesen Kriterien in die engere Auswahl genommen:

- Messung der Infrarot-Reflexion
- Messung der elektrischen Leitfähigkeit
- Messung der Dielektrizitätskonstanten
- Messung der Mikrowellen-Absorption
- Messung der Neutronenstreuung
- Messung der Luftfeuchte
- Wärmefluss-Thermografie

---

<sup>21</sup> Relative Feuchte ist der Anteil an tatsächlich vorhandener Feuchte an der maximal bei dieser Temperatur möglichen Feuchte.

### 3.3.1. Messung der Infrarot-Reflexion

Die Materialoberfläche wird mit einer IR-Quelle bestrahlt. Dieses Verfahren beruht darauf, dass Wasser im nahen Infrarot ( $1,93\ \mu$ ) sehr intensive Absorptionsbanden aufweist, welche die Reflexion in diesem Wellenlängenbereich je nach Wassergehalt mehr oder weniger stark herabsetzen. Das reflektierende Spektrum wird gemessen und dadurch die Feuchte bestimmt.

Einsatz findet es vor allem für Farbpigmente, Kunststoffe, Folien und Holzspäne. [115]

Denkbar wäre dieses Verfahren für die Elektroden und den Separator. Vorteilig ist hier die berührungslose Messung und dass eine Online-Messung möglich ist. Nachteilig ist, dass die Eindringtiefe nicht sehr groß ist. In diesem Fall ist dies eher unbedeutend, da die Beschichtung nicht sehr hoch ist. [Abb.19]

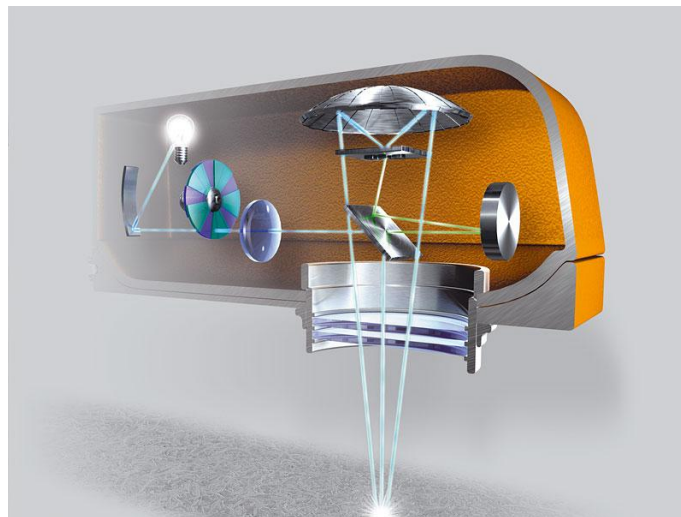


Abbildung 19: Inline-Feuchtemessung mit Infrarottechnik  
Quelle: [92]

### 3.3.2. Messung der elektrischen Leitfähigkeit

Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit erfolgt durch zwei Elektroden, die die Messoberfläche mechanisch kontaktieren. Das Prinzip ist, dass mit zunehmendem Wassergehalt die elektrische Leitfähigkeit steigt.

Vorteilhaft dieses Verfahrens ist die einfache Messtechnik.

Nachteilig bei dieser Methode ist die berührende Messung, die Elektroden müssen in das Messobjekt eingebracht werden. Weiterhin ist die starke Abhängigkeit der Messung von der Leitfähigkeit ungünstig. Wichtig ist, dass das Messmedium keine metallischen oder sonstigen gut leitenden Bestandteile aufweist. Deswegen eignet es sich nicht für die Elektroden, aber denkbar wäre dieses Messverfahren für den Separator. Weiterhin kann ein Wassergehalt kleiner als fünf Prozent nicht erfasst werden. [Abb.20]

Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit wird insbesondere bei Getreide, Holz, Mauerwerk oder für Textilfasern verwendet. [64]



Abbildung 20: Feuchtemessgerät  
Quelle: [77]

### 3.3.3. Messung der Dielektrizitätskonstante

Das Messprinzip beruht darauf, dass die Dielektrizitätskonstante von Wasser deutlich höher ist als die von Feststoffen. Bei Wasser liegt die Dielektrizitätskonstante bei etwa 80 und bei festen Stoffen zwischen 1 und 10. Es wird ein elektromagnetisches Wechselfeld angelegt, die Kondensatorkapazität wird von der Feuchtigkeit beeinflusst. Die Dämpfung, die im gemessenen Frequenzbereich wesentlich von der Anzahl der Wassermoleküle abhängt, wird ausgewertet. [62]

Diese Messmethode ist wieder nur für den Separator denkbar, der Grund ist die Leitfähigkeit der Aluminium- und Kupferfolie.

Die Vorteile sind die Online-Messung und das berührungslos gemessen wird. Einsatz findet dieses Verfahren vor allem bei landwirtschaftlichen Produkten oder Papierbahnen. [Abb.21]



Abbildung 21: Feuchtemess-Sensor  
Quelle: [62]

### 3.3.4. Messung der Mikrowellen-Absorption

Die Mikrowellen-Absorption ist der Messung der Dielektrizitätskonstante ähnlich, jedoch hochfrequenter. Mit sehr geringer Leistung ( $< 0,1 \text{ mW}$ ) durchstrahlt die Mikrowelle das Produkt, dadurch werden die Materialbestandteile unterschiedlich stark polarisiert. Als Reaktion verliert die Mikrowelle Energie und Geschwindigkeit. Der Einfluss der Wassermoleküle ist circa 40 mal größer als der von anderen Bestandteilen, das zeigt wie genau der Wasseranteil gemessen werden kann. [93]

Der Nachteil bei diesem Messverfahren ist, dass es aufwendig und störanfällig ist.

Vorstellbar wäre diese Methode für den Separator und eventuell für die Elektroden, auch hier besteht wieder das Problem der elektrischen Leitfähigkeit von Anode und Kathode.

Die Vorteile sind die schnelle und genaue Feuchtigkeitsbestimmung, die Messung ist berührungslos und eine Echtzeitmessung ist möglich.

Es wird vor allem bei der Feuchtemessung für Sand, Getreide, Textilfasern und Gipsplatten verwendet. [Abb.22]

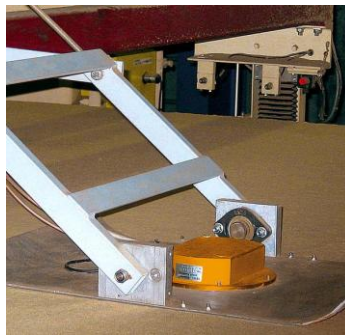


Abbildung 22: Inline-Feuchtemessung mit Mikrowellentechnik  
Quelle: [93]

### 3.3.5. Messung der Neutronenstreuung

Das Prinzip beruht darauf, dass Wasserstoffatome Neutronen abbremsten. Eine Strahlungsquelle sendet die Neutronen aus, diese werden dann durch die Wasserstoffatome abgebremst. In der Nähe vieler Wasserstoffatome ist der Gehalt an langsamen Neutronen hoch, mit einem Zählrohr können diese dann gemessen und die Feuchtigkeit bestimmt werden.

Die Proben werden bei dieser Methode bestrahlt, deswegen gebe es hohe Sicherheitsanforderungen. [66]

Der Vorteil ist hier die berührungslose Echtzeitmessung.

Anwendung findet dieses Verfahren vor allem bei Mauerwerken und Beton. [Abb.23]

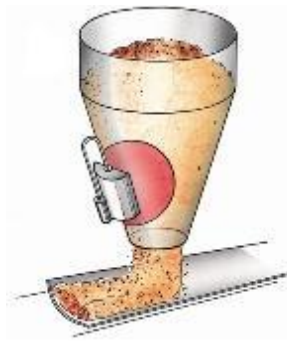


Abbildung 23: Neutronen-Feuchtemessung  
Quelle: [66]

### 3.3.6. Messung der Luftfeuchte

Die Luftfeuchte kann verschieden gemessen werden. Einmal *kapazitiv*: Ein hygroskopisches Polymer<sup>22</sup> befindet sich als Dielektrikum zwischen zwei Kondensatorplatten. Eine der Platten ist wasserdurchlässig, dadurch kann sich ein Gleichgewicht zwischen dem im Polymer eingelagerten Wasser und dem Wasserdampfgehalt in der Umgebungsluft einstellen. Je nach absorbiertem Wasseranteil verändert sich die Kapazität des Kondensators.

Mit einem *Lithiumchlorid-Hygrometer*: Die elektrolytisch arbeitenden Feuchtemessgeräte nutzen die Gegebenheit, dass bei Sättigung des Elektrolyten mit Wasser, sich dessen elektrische Leitfähigkeit ändert.

*Taupunkthygrometer*: Die feuchte Luft streicht über einen gekühlten Spiegel. Die Taupunkttemperatur ist die Temperatur, wenn sich Kondensat auf dem Spiegel bildet. Die Kondensatschicht wird optisch mit der Reflektivität des Spiegels nachgewiesen. Durch die Taupunkttemperatur kann man Rückschluss auf die Luftfeuchte ziehen.

*Infrarot-Absorption*: Grundlage für dieses Verfahren ist die Eigenschaft von Gasen Infrarot-Strahlung einer bestimmten Wellenlänge zu absorbieren. In diesem Fall wird das Licht einer bestimmten Wellenlänge durch den Wasserdampfgehalt absorbiert. [64]

In Papierstapeln wird die Feuchte mittels Schwerthygrometer ermittelt. Dieser wird in den Stapel eingebracht. Dieses Vorgehen ist bei einer Lithium-Ionen-Zelle schwierig, da die Beschichtungen beschädigt werden könnten.

<sup>22</sup> Binden das Wasser aus der Umgebungsluftfeuchtigkeit intermolekular.



Es besteht aber die Möglichkeit, die Messung in der Nähe von Separator, Elektroden und Zellstapel durch einen Fühler durchzuführen.

Nachteilig bei diesem Verfahren ist eine relativ ungenaue Messung der Feuchte in der Beschichtung.

Anwendungsgebiete für dieses Verfahren findet man vor allem in der Land- und Forstwirtschaft beziehungsweise bei der Lagerhaltung und Produktion. [Abb.24]



Abbildung 24: Messung der Luftfeuchte  
Quelle: [133]

### 3.3.7. Wärmefluss-Thermographie

Bei der Wärmefluss-Thermographie werden die Wassermoleküle durch Mikrowellenstrahlung angeregt. Der Feuchtegehalt wird durch die Betrachtung der Wärmeantwort (IR-Emission) der Prüfteiloberfläche bestimmt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die berührungslose Messung und dass die Feuchte lokalisiert werden kann. Weiterhin werden äußerlich nicht sichtbare Fehlstellen erkannt. [64]

Möglich ist diese Methode für den Separator und die Elektroden. [Abb.25]

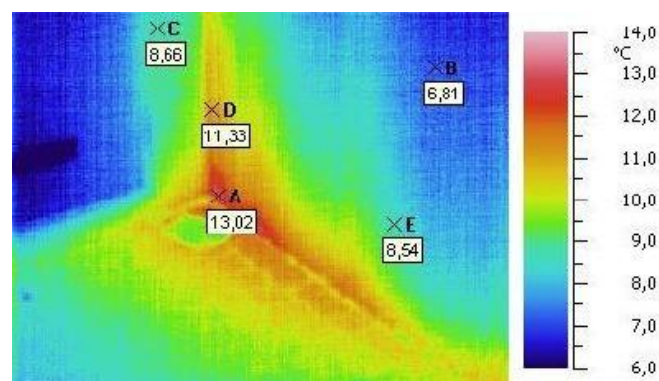


Abbildung 25: Feuchte Stelle im Fußboden  
Quelle: [65]

Ausschlaggebend, was gegen einige Verfahren spricht, ist vor allem, dass sie durch die elektrische Leitfähigkeit der Elektroden beeinträchtigt werden. Ein anderer kritischer Punkt ist die berührende Messung, was bei der Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Fall ist.

Zu empfehlen sind die Wärmefluss-Thermographie und die Messung der Infrarot-Reflexion. Beide Verfahren sind für den Separator und ganz wichtig für die Elektroden durchführbar. Beide Folienarten können über eine Anlage laufen und es ist keine Doppelanlage nötig, dies minimiert Kosten und Platz. Die Infrarot-Reflexion wird in der Folienindustrie auch schon angewendet, wonach schon positive Erfahrungen vorliegen.

Für die Wärmefluss-Thermographie spricht, dass eine Lokalisierung der Feuchtigkeit möglich ist und dass sie außerdem Fehlstellen in der Tiefe erkennt und aufzeigt.

	<b>Berührungs-lose Messung</b>	<b>Online-Messung</b>	<b>Abhängigkeit vom Material (Leitfähigkeit)</b>	<b>Messge- nauigkeit</b>
Messung der Infrarot-Reflexion	ja	ja	nein	ja
Messung der elektrischen Leitfähigkeit	nein	nein	ja	nein, >5%
Messung der Dielektrizitätskonstanten	ja	ja	ja	ja
Messung der Mikrowellen-Absorption	ja	ja	ja	ja
Messung der Neutronenstreuung	ja	ja	nein	ja
Messung der Luftfeuchte	ja/nein	nein	ja	nein
Wärmefluss-Thermografie	ja	ja	nein	ja

Tabelle 4: Feuchtemessung

### 3.4. Randtopografie beim Schneiden

Die Überprüfung der Randtopografie erfolgt nach dem Laserschnitt. Es muss erkannt werden ob eine Kante vorhanden ist und ob diese die kritische Höhe überschreitet, da scharfe Kanten die Separatorfolie durchstechen könnten. Ist der Separator beschädigt, ist die ganze Zelle defekt. [Abb.26] Das Pflichtenheft zur Kantentopografie befindet sich im Anhang unter Punkt III.IV.



Abbildung 26: Randtopografie beim Schneiden  
Quelle: iwv, IWU PG RMV

Verfahren die sich für die Überprüfung der Randtopografie eignen würden sind die Streifenprojektion, das Laser 2D Wegmesssensor Verfahren und die Fokusvariation.

#### 3.4.1. Fokusvariation

Bei der Fokusvariation handelt es sich um ein Messverfahren, das die geringe Schärfentiefe der Optik nutzt, um die Tiefeninformation einer Probenoberfläche zu extrahieren. Eine Laserlichtquelle projiziert einen Fokuspunkt auf die Oberfläche, das reflektierende Licht wird dann auf einen Detektor mit einer Lochblende fokussiert. Die Änderung beziehungsweise die Variation der Schärfe wird in Abhängigkeit der Oberflächentopografie zum Abstand der Optik analysiert. Dies ermöglicht eine genaue Messung, unabhängig von Oberflächenfarbe und -struktur. Beispiel wäre hier der Konfokale 3D-Inline-Sensor.

Anwendung findet dieses Verfahren vor allem in der Halbleiter-, der Glas/Optik- und der Papierindustrie. [50]

Vorteilig ist hier die sehr hohe Auflösung im Nanometerbereich.

Nachteilig ist die sehr kleine Messfläche und das keine Online-Messung möglich ist. [Abb.27]



Abbildung 27: Fokusvariation  
Quelle: [50]

### 3.4.2. Streifenprojektion

Die Streifenprojektion wird auch als Projected-Fringe-Technik oder topometrisches Verfahren bezeichnet. Dieses Verfahren beruht auf dem Triangulationsverfahren, welches im Anhang unter III.IV. in einer Skizze verdeutlicht ist. Ein Projektor wirft ein periodisches Gitter auf das zu messende Objekt. Je nach Form des Objektes wird das Streifenmuster verformt und Erhebungen werden sichtbar. Eine Kamera nimmt das Muster auf und aus den Bildern wird dann eine dreidimensionale Bildkoordinate berechnet.

Anwendung findet dieses Verfahren bei der Vermessung von Werkzeugschneidkanten, bei der geometrischen Qualitätsprüfung dreidimensionaler Werkstücke und zur Digitalisierung von Modellen. [100]

Vorteile sind die hohe Auflösung, die flächenhafte Erfassung, eine punktgenaue Höhenerfassung und minimale Betriebskosten.

Nachteil der Streifenprojektion ist die lange Messdauer. [Abb.28]

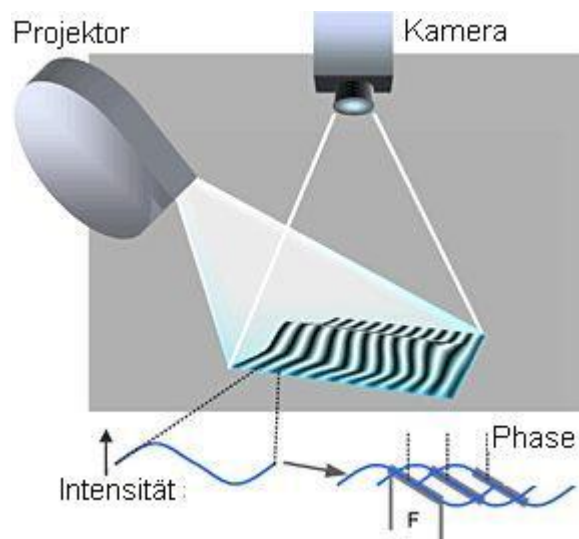


Abbildung 28: Streifenprojektion  
Quelle: [90]

### 3.4.3. Laser 2D Wegmesssensor

Der Laser 2D Wegmesssensor beruht auf dem Prinzip der Lasertriangulation. Der Laserstrahl wird mit einer Optik zu einer statischen Linie aufgeweitet und auf die Messoberfläche projiziert. Mit einer Empfangsoptik wird das diffus reflektierte Laserlicht auf einer Sensormatrix abgebildet, der Abstand in x- und z-Richtung wird dann errechnet. Zur 3D Erfassung muss entweder der Sensor oder das Prüfobjekt bewegt werden.

Anwendungsgebiete sind zum Beispiel bei der Reifenvermessung oder bei der Schweißnahtverfolgung zur Pipeline-Prüfung. [106]

Vorteile dieses Verfahrens sind die hohe Auflösung und die Echtzeitmessung. Nachteilig ist hier die geringe Anzahl an Messpunkten, für die Kantenmessung ist dies dennoch ausreichend. [Abb.29]

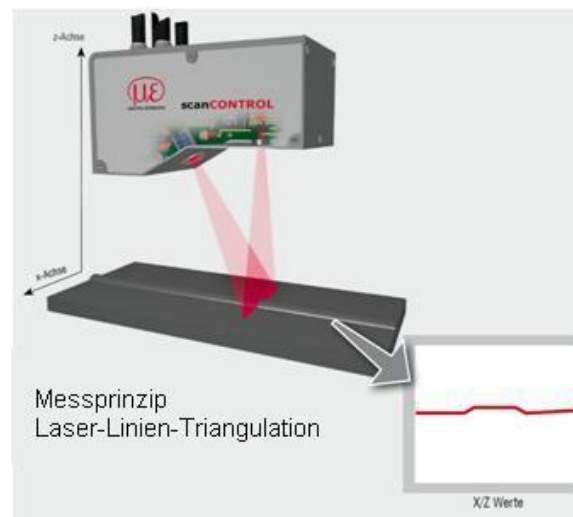


Abbildung 29: Laser 2D Wegmesssensor  
Quelle: [108]

Gegen die Fokusvariation spricht die sehr kleine Messfläche und die Streifenprojektion besitzt eine zu lange Messdauer. Zu empfehlen ist der Laser 2D Wegmesssensor, da in Echtzeit gemessen werden kann und die Methode eine hohe Auflösung besitzt.

	<b>hohe Auflösung</b>	<b>Große Messfläche</b>	<b>Geringe Messdauer</b>	<b>Online- Messung</b>
Fokusvariation	ja	nein	ja	nein
Streifenprojektion	ja	ja	nein	ja
Laser 2D Wegmesssensor	ja	ja	ja	ja

Tabelle 5: Randtopographie

### 3.5. Zerstörungsfreies Prüfen der Ableiterföhnchen

In der Industrie werden die Ableiter mit Ultraschall verschweißt. Im DeLIZ-Projekt werden diese mittels Remote-Laser geschweißt. Dieses Prinzip eignet sich für eine hohe Anzahl an Fügeverbindungen, bis zu 200 Schweißverbindungen in der Minute können realisiert werden. Nebenzeiten werden auf ein Minimum reduziert, damit kann eine Zeitersparnis von bis zu 30% zu konventionellen Produktionsmethoden verwirklicht werden. [4]

Es ist darauf zu achten, dass die Föhnchen fachgerecht angeschweißt sind. Die Schweißverbindungen müssen mechanisch und elektrisch intakt sein, wenn die mechanische Verbindung einwandfrei ist, ist es wahrscheinlich, dass auch der elektrische Kontakt hergestellt ist. Bei starken Vibrationen bei der Autofahrt können nicht intakte Schweißverbindungen aufbrechen. Kriterien sind die Online-Messung, Tiefendetektion und eine geringe Messdauer. Nennenswerte Verfahren nach diesen Kriterien sind die Ultraschallprüfung, das Lichtschnittverfahren und die Wärmefluss-Thermographie.

### 3.5.1. Ultraschallprüfung

Ein Ultraschallimpuls durchläuft das Prüfobjekt, dadurch entstehen Wechselwirkungen mit der Struktur des Prüfstücks. Um Rückschlüsse auf die innere Beschaffenheit des Prüfobjektes zu ziehen, werden die Ultraschallechos Empfangen und Ausgewertet.

Anwendung findet dieses Verfahren vor allem bei der Kontrolle von Schweißnähten. [132]

Vorteil ist, dass dieses Verfahren Fehler in der Tiefe erkennt.

Nachteile sind, dass keine Online-Messung möglich ist, die relativ lange Messdauer und das eventuell ein Kontaktmittel benötigt wird. [Abb.30]

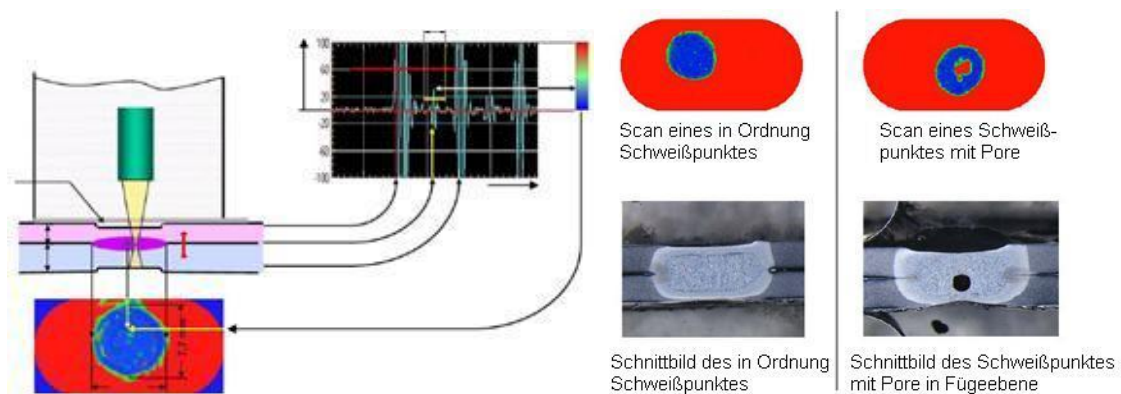


Abbildung 30: Ultraschallprüfung  
Quelle: [58]

### 3.5.2. Lichtschnittverfahren

Ein Laser projiziert eine helle Linie auf die Schweißnaht, die von einer schräg angeordneten Hochgeschwindigkeitskamera als Höhenprofil erfasst wird. Der aufgenommene Laserstrich wird in x- und y-Koordinate umgewandelt. Anwendungsgebiet hauptsächlich bei der Kontrolle von Schweißnähten auf Löcher und Oberflächenporen. [113]

Vorteile sind die Online-Messung und die hohe Auflösung.

Nachteilig ist, dass nur die Oberfläche geprüft wird, Fehler in der Tiefe werden nicht erkannt. [Abb.31]

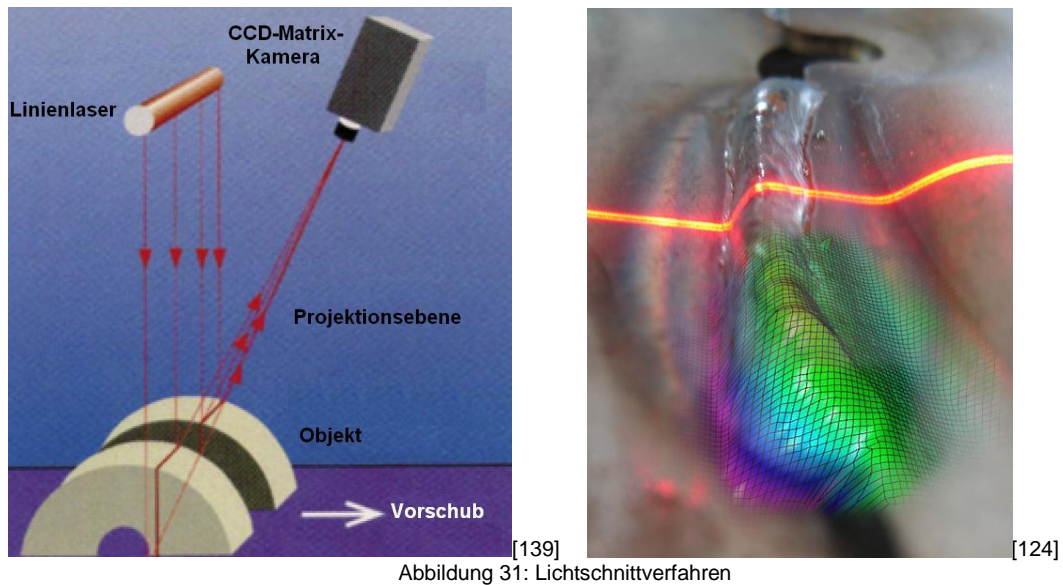


Abbildung 31: Lichtschnittverfahren

### 3.5.3. Wärmefluss-Thermographie

Bei der Wärmefluss-Thermographie wird das Bauteil inhomogen erwärmt, meistens über Blitzanregung. Mit einer Wärmebildkamera oder einer Infrarotkamera wird der Wärmefluss beziehungsweise die Wärmeleitfähigkeit eines Prüflings beim aufheizen oder abkühlen analysiert. Betrachtet werden die dynamischen, zeitlich veränderlichen Wärmeströme.

Bei der aktiven Wärmefluss-Thermographie wird das Untersuchungsobjekt mittels einer externen Wärmequelle erwärmt. Beim Abkühlvorgang des Objektes können Fehlstellen mit geringer Wärmeleitfähigkeit erkannt werden. Gute Schweißverbindungen haben eine höhere Wärmeleitfähigkeit als schlechte Schweißverbindungen. [99]

Im Durchlicht-Modus wird das Bauteil zwischen Kamera und Anregung positioniert, dagegen befinden sich im Auflicht-Modus die Kamera und die Anregung auf der gleichen Bauteilseite. [142] [Abb.32]

Im Anhang unter Punkt III.V. die Lockin-, Impuls-, Ultraschall- und Induktions-thermografie nach ihrer Eignung für diverse Fehlerbilder beleuchtet.

Die Thermografie findet Anwendung bei der Fremdkörpererkennung in Lebensmitteln, Erkennung von Verklebungsfehlern und bei der Qualitätskontrolle bei Laserschweißnähten.



Vorteilhaft ist hier, dass berührungslos und online gemessen wird. Weiterhin besitzt diese Methode eine hohe Auflösung und es kann Defekte in der Tiefe erkennen.

Nachteil ist einmal die Erwärmung des Objektes, weiterhin ist die Art der Umwandlung vom gemessenen Wert zur Temperatur nicht ganz unproblematisch. Metalle haben einen kleinen Emissionsgrad<sup>23</sup>, dadurch ermittelt die Kamera eine viel geringere Temperatur als in Wirklichkeit der Fall ist.

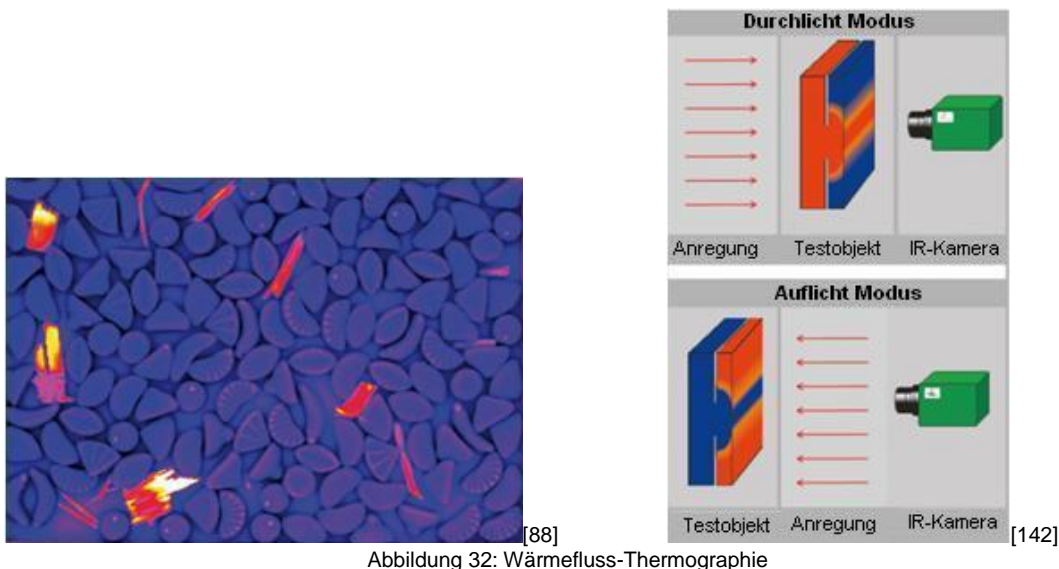


Abbildung 32: Wärmefluss-Thermographie

Das Fazit ist, dass bei der Ultraschallprüfung keine Echtzeitmessung möglich ist, damit wird schon ein Hauptkriterium nicht erfüllt. Beim Lichtschnittverfahren wird nur die Oberfläche geprüft, Fehler in der Tiefe werden nicht erkannt. Vorschlagen ist die Wärmefluss-Thermographie, da die Messung online ist und sie auch Defekte in der Tiefe erkennen kann.

	<b>Tiefen- erkennung</b>	<b>Online- Messung</b>	<b>geringe Messdauer</b>
Ultraschallprüfung	ja	nein	nein
Lichtschnittverfahren	nein	ja	ja
Wärmefluss- Thermographie	ja	ja	ja

Tabelle 6: Prüfverfahren der Ableiterfährchen

<sup>23</sup> Gibt an, wie viel Wärmestrahlung ein Körper im Vergleich zu einem idealem Wärmestrahler, einem sogenannten schwarzen Körper, abgibt.

### 3.6. Partikelerkennung

Es soll ein geeignetes System zur Erkennung von Partikeln auf der Oberfläche von Separator, Kathode und Anode gefunden werden.

Was ist zu beachten: Partikel mit einer Größe ab 20 µm müssen sicher erkannt werden, da Partikel ab diesem Ausmaß den Separator durchstechen könnten. Problematisch ist die Erkennung von Partikeln, die aus dem gleichen Material bestehen, wie der Untergrund. Durch das Lasern gelangen diese auf die Oberfläche. Hierfür gibt es noch keine Techniken, vor allem da die Oberfläche rau ist, können viele Partikel nicht sicher erkannt werden. Eventuell müsste das Material verbessert werden.

Die Erkennung muss eine Breite von 220 mm abdecken. Die Messung erfolgt inline, deswegen ist eine hohe Messgeschwindigkeit notwendig.

In der engeren Auswahl ist das Streiflicht Verfahren, das Shape from Shading Verfahren, der Laser 2D Wegmesssensor, die Weißlicht-Interferometrie, das Verfahren mittels Thermografie und optische Prüfverfahren.

Das Pflichtenheft zur Partikelerkennung befindet sich im Anhang unter dem Punkt III.VI.

#### 3.6.1. Streiflicht Verfahren

Bei diesem Verfahren wird die Oberfläche von der Seite beleuchtet, der Hintergrund wird ausgeblendet und die auf der Oberfläche liegenden Partikel angestrahlt. So entsteht ein starker Kontrast zwischen Oberfläche und Partikel. Die Partikel können dann von einem Bildverarbeitungssystem detektiert werden.  
[119]

Diese Methode findet in der Partikeldetektion und in der Lackier- und Beschichtungstechnik vorrangig Anwendung.

Der Vorteil des Streiflicht Verfahrens ist die hohe Auflösung.

Nachteile sind die geringe Messfläche und die lange Messdauer. [Abb.33]

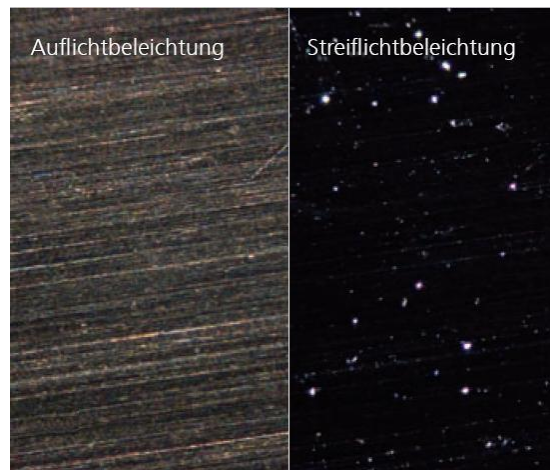


Abbildung 33: Streiflicht Verfahren, Edelstahl Oberfläche  
Quelle: [14]

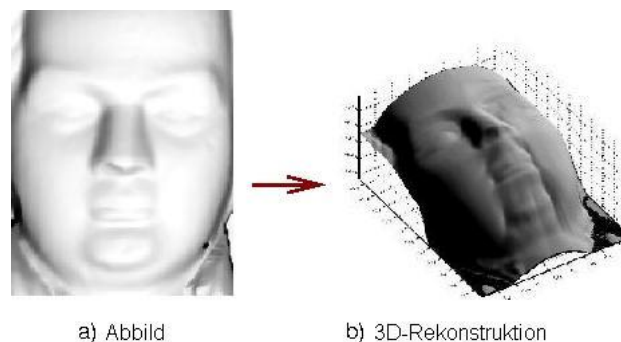
### 3.6.2. Shape from Shading

Das Shape from Shading Verfahren beruht auf dem Prinzip der Photometrie. Aus der Schattierung von Oberflächen können Informationen über die dreidimensionale Form eines Objekts gewonnen werden. Aus mehreren Eingangsbildern mit unterschiedlichen Beleuchtungseinrichtungen können dann Erhebungen und Vertiefungen berechnet werden. Der Messbereich liegt zwischen 20 mm bis 200 mm.

Einsatz findet diese Methode in der Inspektion von Dichtflächen an Drehteilen und Erkennung von Oberflächendefekten auf Endlosmaterial. [98]

Vorteilhaft ist die hohe Auflösung und dass dieses Verfahren für glatte aber auch für raue Oberflächen sehr gut geeignet ist.

Ein Nachteil ist, dass niedrige Frequenzen (Grobform) verloren gehen. Zudem besitzt dieses Verfahren eine lange Messdauer. [Abb.34]



a) Abbild

b) 3D-Rekonstruktion

Abbildung 34: Shape from Shading  
Quelle: [98]

### 3.6.3. SPARC 3D-Oberflächeninspektion

Ist ein modifiziertes Shape from Shading Verfahren. Es werden bis zu vier Bilder mit unterschiedlichen Beleuchtungseinrichtungen aufgenommen, aus denen dann die 3D-Oberflächenstruktur berechnet wird. Eine Messfläche von circa 150 mm x 150 mm kann mittels der SPARC 3D-Oberflächeninspektion überprüft werden. [97]

Der Vorteil ist die hohe Auflösung und die Online-Messung. Man erhält ein 3D-Abbild der Oberfläche und ist somit unabhängig von farblichen Veränderungen oder Beleuchtungseffekten an der Oberfläche.

Der Nachteil ist eine lange Messdauer. [Abb.35]

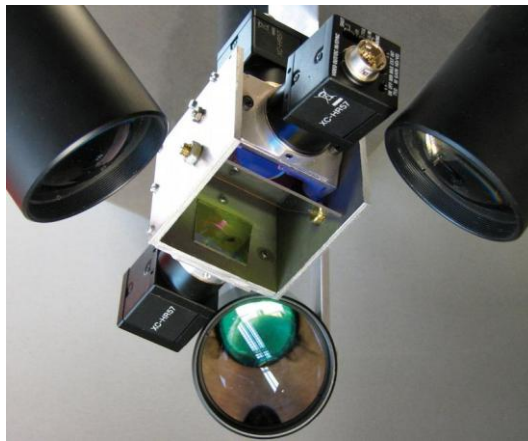


Abbildung 35: SPARC 3D-Oberflächeninspektion  
Quelle: [97]

### 3.6.4. Laser 2D Wegmesssensor

Dieses Verfahren wurde schon ausführlich unter 3.4.3. erläutert. Für die Partikelerkennung wird dieses Verfahren wahrscheinlich nicht funktionieren, da der Laserstrahl auf die Messbreite von circa 150 mm aufgeweitet wird, gemessen wird nur ein Profil von 640 bis 1024 Punkten. Der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten ist so groß, dass die Wahrscheinlichkeit besteht, dass Partikel übersehen werden. Der Laser 2D Wegmesssensor ist nur interessant für die Betrachtung der Schnittkanten.

### 3.6.5. Weißlicht-Interferometrie

Bei diesem Verfahren werden die Interferenzeffekte, die bei der Überlagerung des vom Objekt reflektierten Lichts mit dem von einem hochgenauen Referenzspiegel zurückgestreuten Lichts auftreten, genutzt. Diese Methode basiert auf dem Prinzip des Michelson-Interferometers. Ein Strahlteiler teilt den Lichtstrahl in einen Mess- und Referenzstrahl auf. Der Messstrahl trifft dann das Messobjekt und der Referenzstrahl den Spiegel. Das vom Spiegel und Messobjekt zurückgeworfene Licht wird am Strahlteiler wieder überlagert und auf einer Kamera abgebildet. Stimmt der optische Weg für einen Objektpunkt im Messarm mit dem des Referenzarms überein, kommt es für alle Wellenlängen im Spektrum der Lichtquelle zu einer konstruktiven Interferenz. Das Kamerapixel des Objektpunktes hat die maximale Intensität. Alle Objektpunkte, die diese Bedingung nicht erfüllen, haben eine niedrige Intensität. Die Kamera registriert alle Bildpunkte, die dieselbe Höhe haben. [47]

Einsatz bei der Vermessung topografischer und geometrischer Vorgaben von Halbleitern und bei der Oberflächenqualität von Uhrenbauteilen.

Vorteil der Weißlicht-Interferometrie ist die hohe Auflösung, nachteilig jedoch die geringe Messbreite von 19 mm. [Abb.36]

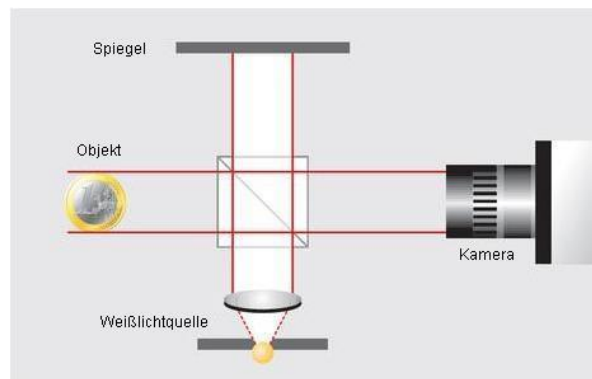


Abbildung 36: Weißlicht-Interferometrie  
Quelle: [117]

### 3.6.6. Thermografie

Der Wärmefluss auf der Oberfläche wird mittels Thermografie betrachtet. Auf der Oberfläche liegende Partikel haben eine andere Temperaturverteilung als das Oberflächenmaterial und können so sicher erkannt werden.

Bei Vorversuchen im Labor konnten die Partikel nicht ausreichend und den Anforderungen entsprechend detektiert werden. Grund war eine zu langsame Kamera. Bei weiteren Versuchen bei Lieferanten wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera verwendet, damit konnten die Partikel sicher erkannt werden. Nachteil ist hier der hohe Preis und die kleine Messfläche.

### 3.6.7. Hochauflösende Zeilenkameras und Bildverarbeitungssysteme

Hochauflösende Zeilenkameras werden vorrangig für Oberflächeninspektionen verwendet [118]. Dieser Kamerateyp weist nur eine lichtempfindliche Zeile auf, da eine Zeile eine relativ geringe Chipfläche benötigt, lassen sich relativ viele Pixel auf einer Zeile unterbringen. Weiterhin lässt sich eine Zeile schneller auslesen als eine Fläche. [Abb.37]



Abbildung 37: Hochauflösende Zeilenkamera  
Quelle: [128]

Bildverarbeitungssysteme haben vielerlei Anwendungsgebiete, vorrangig werden sie zur Identifikation, zur Oberflächeninspektion und zur Positionserkennung von Objekten verwendet. [67]

Eine Kamera nimmt ein Bild auf, die Daten werden digitalisiert und auf prüfrelevante Merkmale untersucht. Diese visuellen Merkmale können vermessen, verglichen und verifiziert werden. Die Ergebnisse werden interpretiert und an die Maschinensteuerung weitergegeben, die nach diesen Ergebnissen reagiert. [67] Essentiell für ein gutes Bild, ist die Beleuchtung. Sie ist entscheidend, wie gut ein Prüfmerkmal erkannt werden kann.

## Beleuchtung

Für die Beleuchtung gibt es verschiedene Merkmale. Der Einstrahlwinkel ist sehr bedeutend, gerade für die Partikelerkennung. Da die Partikel dieselbe Farbe aufweisen wie der Untergrund, sind sie nur sehr schwer zu erkennen. Deshalb bietet sich eine Bestrahlung von der Seite an. Die Partikel werfen Schatten und können somit besser erkannt werden. Die Lichtfarbe und -stärke sind ebenfalls für die Qualität des Bildes relevant und auf den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen. Zum Beispiel werden für stark reflektierende Materialien vorrangig dunklere Farben eingesetzt, wie zum Beispiel blau. Weiterhin kann man zwischen Hellfeld und Dunkelfeld unterscheiden. [Abb.38]

Beim Hellfeld sieht die Kamera direkt in das reflektierende Licht hinein. Es wird vor allem bei nichtreflektierenden Materialien verwendet, die durch ihre poröse und matte Oberfläche das Licht stark streuen. Beim Dunkelfeld geht der reflektierende Lichtstrahl an der Optik der Kamera vorbei, nach dem Prinzip von Einstrahlwinkel=Ausfallwinkel. Das gesamte Licht wird von der Kamera weggelenkt und so bleibt das Feld dunkel. Partikel, Erhöhungen, Vertiefungen und Kratzer stören den Strahlengang des Lichts und reflektieren es hin zur Kamera. Die Fehlstellen werden dann im Kamerabild hell abgebildet. [Firma Dr. Schenk]

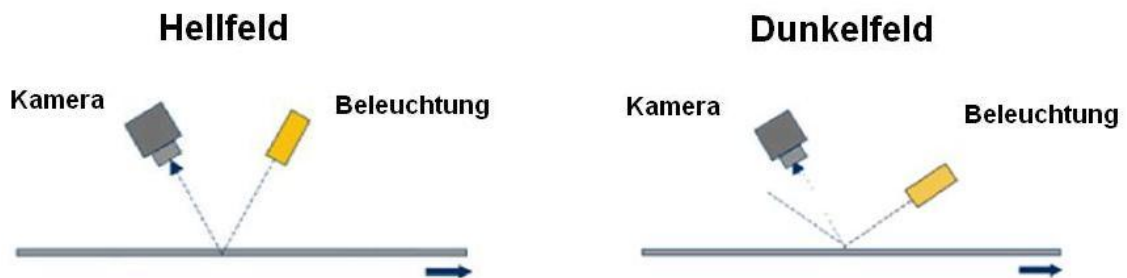


Abbildung 38: Hell- und Dunkelfeld  
Quelle: In Anlehnung an die Firma Dr. Schenk

Um zu prüfen, ob optische Verfahren den hohen Anforderungen an die Detektion von Partikeln genügen, wurden Versuche durchgeführt. Es soll ein geeigneter Einstrahlwinkel gefunden werden, bei dem die Partikel am besten detektiert und vermessen werden können. Die Kriterien für diese Versuche waren die Erkennung von Partikel ab 50 µm und eine Größenbestimmung der Partikel.



### 3.6.8. Experimentelle Untersuchung zur Partikelerkennung

#### Versuchsaufbau [Abb.39]

Genutzt wurde ein 50  $\mu\text{m}$  maschiges Sieb<sup>24</sup>, um Kathodenpartikel auf der Kathodenfolien und Anodenpartikel auf der Anodenfolie zu erzeugen. Um die Partikel zu erkennen wurde ein Mikroskop -Nikon SMZ 1000<sup>25</sup>- verwendet. Mit einer Kamera -Nikon Coolpix 4500<sup>26</sup>-, die sich auf das Mikroskop aufschrauben lässt, werden die Abbilder fotografiert.

Eine LED-Leuchte<sup>27</sup> (Spot Beleuchtung) -LT-1679- wurde an ein Labornetzgerät<sup>28</sup> angeschlossen und dann in einer Vorrichtung eingespannt.

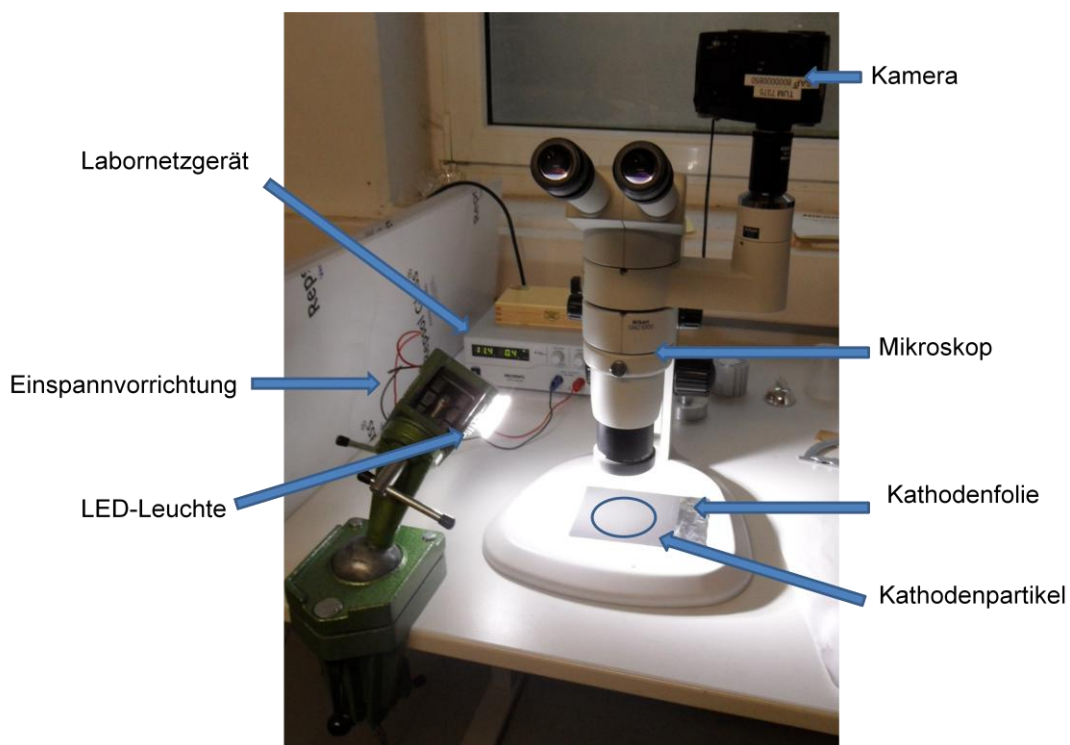


Abbildung 39: Versuchsaufbau

<sup>24</sup> Datenblatt unter der Quelle [121]

<sup>25</sup> Datenblatt unter der Quelle [114]

<sup>26</sup> Datenblatt unter der Quelle [75]

<sup>27</sup> Datenblatt unter der Quelle [103]

<sup>28</sup> Datenblatt unter der Quelle [73]



### Versuchsdurchführung

Mit einem 50  $\mu\text{m}$  maschigen Sieb wurden Kathodenpartikel kleiner/gleich 50  $\mu\text{m}$  auf eine Kathodenfolie aufgestreut und unter das Mikroskop gelegt. Die LED-Leuchte besitzt einen Lichtstrom von 1500 bis 2000 Lumen [103]. Sie wurde mit einem Abstand von 15 cm von der Objektiv Mitte und einer Höhe von 2,5 cm von der Objektaufgabe eingespannt. Mit Hilfe des Satzes des Pythagoras kann der Einstrahlwinkel  $\alpha$  errechnet werden (Siehe Anhang Punkt III.VII.I.). Es können auch andere Abstände gewählt werden, in diesem Versuch hat sich ein Abstand von 15 cm von der Objektiv Mitte angeboten, die Höhen variieren vom zu erzeugenden Einstrahlwinkel. Der Einstrahlwinkel  $\alpha$  ergibt für diese Angaben rund  $10^\circ$ . Die im Mikroskop ausgeleuchtete Stelle auf der Kathodenfolie wurde unter 8-facher Vergrößerung aufgezeichnet. Für die weiteren Versuche wurde der Einstrahlwinkel um jeweils  $10^\circ$  erhöht, bis ein maximal möglicher Winkel von  $60^\circ$  erreicht wurde. Einen höheren Einstrahlwinkel ließ sich nicht mehr einstellen, da das Objektiv des Mikroskops die LED-Leuchte behinderte oder es Schatten auf das beleuchtete Objekt warf. Gemessen wurde immer mit dem Abstand zur Objektiv Mitte und der Höhe von der Objektaufgabe zur LED-Leuchte. Es wurde darauf geachtet, dass der Abstand von 15 cm immer eingehalten wurde und nur die Höhe verändert wird, damit ein genauer Vergleich dargestellt werden kann. Die genauen Höhen sind im Anhang unter Punkt III.VII.I. aufgezeigt. Die einzelnen Schritte wurden jeweils fotografiert und protokolliert.

Danach wurden Anodenpartikel mittels des Siebes auf die Anodenfolie gestreut und die Folie auf die Objektaufgabe gelegt.

Die Leuchte wurde wieder mit denselben Abständen und denselben Höhen (ersichtlich im Anhang unter Punkt III.VII.I.), wie bei der Kathodenfolie ausgerichtet. Der Einstrahlwinkel wurde also ab  $10^\circ$  in Zehnerschritten erhöht bis zu  $60^\circ$ , die Abbilder fotografiert und protokolliert.

### Versuchsauswertung

Für die LED-Ausleuchtung werden Beispielfall nur die Bilder mit dem Einstrahlwinkel von  $10^\circ$  und  $30^\circ$  herausgenommen, weil diese den wichtigsten Unterschied darstellen. Die anderen Fotografien zur Kathode sind im Anhang unter Punkt III.VII.II. ersichtlich. Die Partikel sind bei beiden Varianten sehr gut sichtbar. Bei der Kathode erkennt man, dass die Partikel bei einem Einstrahlwinkel von  $10^\circ$

Schatten werfen, bei einem Einstrahlwinkel von  $30^\circ$  ist dies weniger der Fall. [Abb.40] Durch den Schatten können die Partikel bei einem Einstrahlwinkel von  $10^\circ$  sehr gut detektiert werden. Das Problem hierbei ist, dass die genaue Größe der Partikel nicht feststellbar ist, da der Schatten bei diesem Einstrahlwinkel sehr weit reichend ist und es schwierig ist ihn vom Partikel zu unterscheiden. Deshalb würde sich ein Einstrahlwinkel von  $30^\circ$  besser eignen.



Kathode  $10^\circ$



Kathode  $30^\circ$

Abbildung 40: LED-Leuchte Kathode

Zwischen dem Einstrahlwinkel von  $40^\circ$  und dem Einstrahlwinkel von  $30^\circ$  ist kein großer Unterschied zu erkennen, auch dieser Einstrahlwinkel ist geeignet um die Partikel zu erkennen und ihre Größe zu bestimmen. Ab einem Einstrahlwinkel von  $50^\circ$  verschlechtert sich die Detektion, die Partikel werden blasser dargestellt.

Alle Fotografien zur Anode sind im Anhang unter Punkt III.VII.III. ersichtlich. Bei der Anode ergibt sich dasselbe Problem. Auch hier werfen die Partikel bei einem Einstrahlwinkel von  $10^\circ$  Schatten, was bei einem Einstrahlwinkel von  $30^\circ$  nicht allzu sehr der Fall ist. [Abb.41] Damit würde sich auch hier ein Einstrahlwinkel von  $30^\circ$  besser eignen.

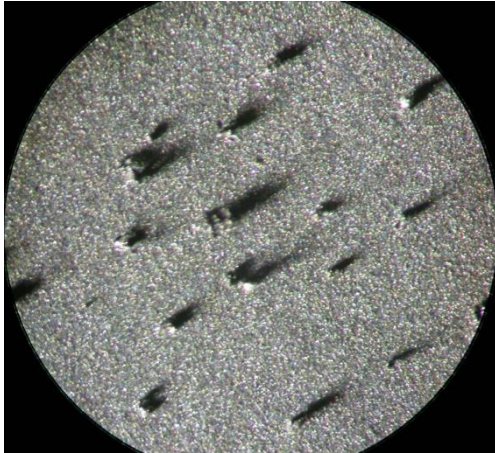
Anode  $10^\circ$ Anode  $30^\circ$ 

Abbildung 41: LED-Leuchte Anode

Die Frage ist nun, ob Partikel bis zu  $50\text{ }\mu\text{m}$  sicher erkannt werden können? Dazu muss die Größe der abgebildeten Partikel erfasst werden, dies kann über die Bildauflösung geschehen. Der beleuchtete und aufgenommene Bereich hat einen Durchmesser von  $3\text{ mm}$  und das Abbild besitzt eine Abmessung von  $1860$  Pixeln in der Breite, somit ist ein Pixel rund  $1,6129\text{ }\mu\text{m}$  (Rechnung im Anhang unter Punkt III.VII.IV.). Das kleine Partikel im unteren Bild hat daher eine Größe von  $54,8\text{ }\mu\text{m}$ , wenn man von einer Breite von  $34$  Pixeln ausgeht. Das große Partikel, mit einer Breite von  $126$  Pixeln, ist  $203,2\text{ }\mu\text{m}$  groß. [Abb.42] Am Anfang des Experimentes wurde davon ausgegangen, dass durch das Sieb nur Partikel kleiner/gleich  $50\text{ }\mu\text{m}$  hindurch fallen, also woher kommen diese großen Partikel? Bei näherer Betrachtung sind die großen Partikel immer länglich, das heißt dass die Partikel länglich durch das Sieb durchgedrückt wurden, dadurch sind die Partikel größer als wie angenommen  $50\text{ }\mu\text{m}$ . Einige Partikel sind auch Anhäufungen von mehreren Partikeln.

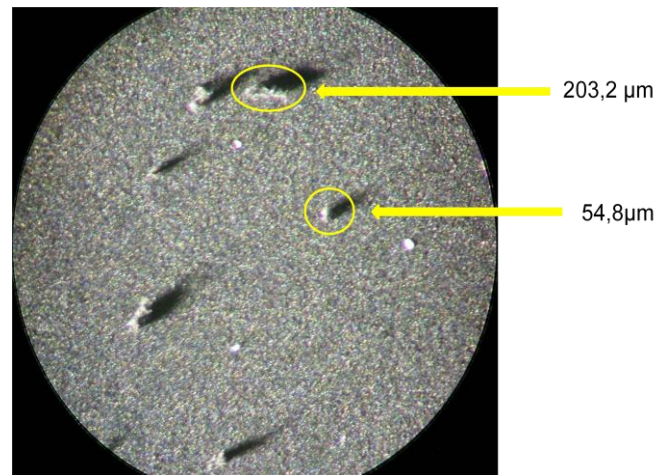


Abbildung 42: LED-Leuchte Anode 10°

Problematisch ist auch hier wieder die geringe Messfläche, es würden zwei Kameras benötigt, um die Messfläche von 220 mm abzudecken [Aussage von der Firma Dr. Schenk]. Da die Ober- und Unterseite der Elektrodenblätter überprüft werden muss, werden vier Kameras benötigt.

Bei den meisten hier genannten Verfahren zur Partikelerkennung, hängt die Detektion der Partikel von der Auflösung der benutzten Kamera ab. Es können mehrere Kameras verwendet werden, die aber sehr teuer sind. Deswegen muss man den Kosten-Nutzen-Effekt abwägen.

### 3.7. Integration in den Herstellungsprozess

Die Qualitätssicherungsmaßnahmen müssen nun in den Herstellungsprozess integriert werden. Um die Stabilität des Prozesses zu gewährleisten wird ein Temperatursensor und ein Feuchtesensor für die Überwachung des Trockenraumes integriert. Die Bahnkantensteuerung und die Bahnspannungsregelung müssen auf jeden Fall in den Prozess eingegliedert werden. Die Bahnspannung wird über ein Tänzersystem geregelt, dieses ist dafür zuständig, dass die Folien nicht zerreißen oder durchhängen. Die Bahnkantensteuerung dient zur Einhaltung der genau definierten Laufbahn des Materials. Schwankungen der Laufrichtung werden erfasst und korrigiert. Diese zwei Systeme werden kurz nach der Abwicklung der Materialien von der Rolle eingesetzt, für alle drei Materialien, die Separatorfolie, die Anodenfolie und die Kathodenfolie.

Für den Elektrodenzuschnitt werden zwei Kamerasysteme benötigt, eines für die Laserpositionierung und eines für die Geometrie- und Lageerkennung der Elektrodenfolie. Ein Kamerasystem erfasst die Position des Elektrodenmaterials, vermisst die Beschichtungskante und erkennt vormarkierte Fehler vom Hersteller, diese Daten werden dann an das Lasersystem übermittelt. Das Lasersystem positioniert anhand dieser Daten entsprechend den Schnittverlauf.

Die Lage- und Geometrieerkennung der Elektrodenfolie vor dem Schnitt übernimmt das zweite Kamerasystem. Die Kamera erfasst die Kanten der Elektroden, wenn die Kanten fixiert sind, führt der Laser den Schnitt durch.

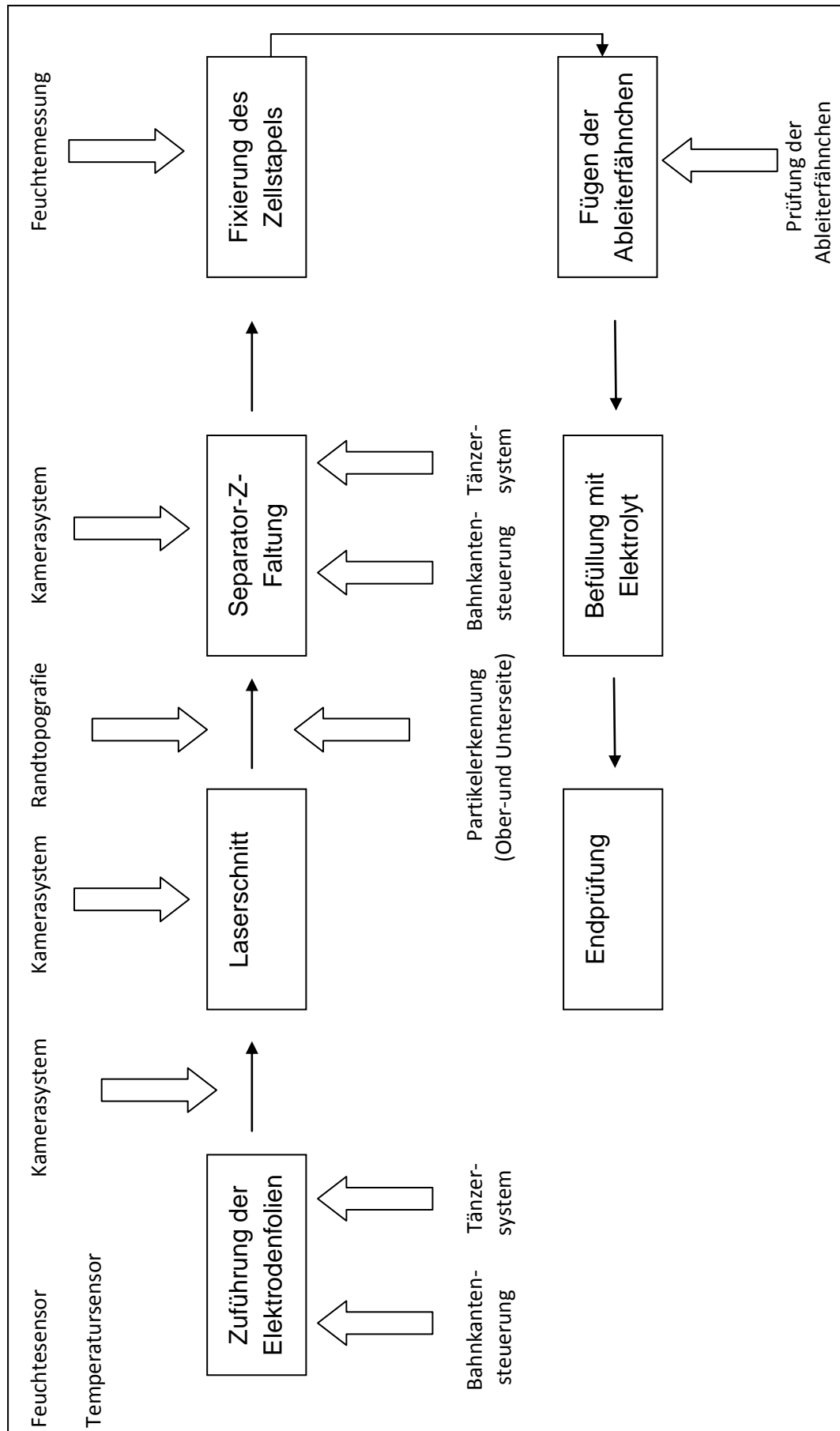
Eine Handlingseinheit führt die Elektrodenblätter dann zur Magazinierung, gute Elektrodenblätter und der Ausschuss werden voneinander getrennt. Bei der Einlegung der Elektrodenblätter in die Separator-Z-Faltung überwacht ein weiteres Kamerasystem die exakte Position der abgelegten Elektroden.

Die Partikelerkennung kann optional zur Eingangsprüfung verwendet werden. Dies würde sich kurz nach der Abrollung der Folien anbieten. Die Partikelerkennung an diesem Punkt ist aber nicht unbedingt notwendig, da die Rollen beim Hersteller, bevor sie aufgewickelt werden, einer Endprüfung unterzogen werden. Partikel oder Kratzer könnten nur durch den Transport auf die Folien gelangen. Integriert werden muss die Partikelerkennung auf jeden Fall nach dem Laserschnitt. Zu beachten ist, dass die Ober- und die Unterseite der Oberfläche geprüft wird.

Die Randtopographie sollte auch kurz nach dem Schneidprozess überprüft werden. Elektrodenblätter mit einem zu großem Grat müssen aussortiert werden.

Die Messung der Feuchte im Zellstapel sollte nach der Durchtrennung der Separatorfolie und der Fixierung des Zellstapels stattfinden.

Die Überprüfung der Schweißpunkte an den Ableiterfähnchen findet nach dem Anfügen der Ableiter mittels Remote-Laser-Schweißens statt.



## 4. Zusammenfassung

In Deutschland gibt es kaum Serienfertigungen für die Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen und bei den Wenigen ist der Prozesse noch nicht ausgereift. Nur vereinzelte Qualitätssicherungsmaßnahmen kommen zum Einsatz. Es besteht also noch viel Optimierungspotenzial, diese Tatsache macht es Notwendig auf dem Gebiet weiter zu forschen. Die Anforderungen an die Batterie sind beträchtlich, die Energiedichte, die zyklische und kalendarische Lebensdauer, die Ladegeschwindigkeit und die Sicherheit sollen verbessert werden. Außerdem soll das Gewicht und die Kosten für das Produkt und für die Herstellung gesenkt werden.

Ein Elektroauto besitzt dieselben Sicherheitsanforderungen wie ein herkömmlicher PKW. Um diese zu gewährleisten, muss am Ende des Prozesses ein einwandfreies Produkt hergestellt werden. Darum wird an Qualitätssicherungssystemen gearbeitet, die einfließende Faktoren auf den Prozess und auf das Produkt überwachen beziehungsweise überprüfen.

Der Vorteil von Elektroautos ist der geräuscharme Antrieb, weiterhin besitzen sie einen Effizienzgrad von circa 80%. Im Gegensatz zum Verbrennungsmotor, der einen Wirkungsgrad von knapp 30% aufweist. Die politischen Ziele sind unter anderem vom Öl unabhängiger zu werden, ebenso sollen die Batterien dazu genutzt werden das Stromnetz zu stabilisieren.

Beachtet man die Energiegewinnung, dass die Energie nur aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen wird, dann würde für die Erzeugung Emissionen von höchstens 3 - 5 g/km entstehen.

Mit einem Atomgewicht von 6,94 u ist Lithium das leichteste Metall, wegen seinem geringen Gewicht wird es vorrangig für tragbare Geräte eingesetzt.

Die Vorzüge von Lithium-Ionen-Batterien sind, dass sie keinem Memory-Effect unterliegen, sie besitzen eine hohe Energiedichte und über den gesamten Entladezeitraum herrscht eine konstante Spannung.

Eine Li-Ionen-Batterie besteht aus einer Anode, einer Kathode, einem flüssigem Elektrolyt und einem Separator.

Die Zellbildung ist das Herzstück des Herstellungsprozesses. Problematisch ist die Handhabung des Separators. Durch die statische Aufladung ist eine verein-



zelte Aufnahme nur schwer umsetzbar. Meistens werden mehrere Blätter aufgenommen, die unterwegs herunterfallen oder mit in den Stapel eingebracht werden. Kritisch bei den Elektroden ist die Gefahr von Abplatzungen an der Beschichtung, was durch einen Knickvorgang beim Prozess passieren kann. Ebenso ist der Grat an den Kanten problematisch, die durch den Laserschnitt entstehen. Damit einige Barrieren umgangen werden können, wurde der Teilprozess so weiterentwickelt, dass der Separator Z-artig gefaltet wird und dann die Elektroden alternierend dem Separator zugefügt werden.

Der Prozess läuft in einem Trockenraum ab, das heißt dass sich die Luftfeuchte und die Temperatur auf die Qualität des Produktes auswirken, diese Einflussfaktoren müssen ständig mittels eines Feuchtesensors und eines Temperatursensors überwacht werden.

Hauptqualitätsmerkmale sind die Partikelerkennung, die Feuchtemessung, die Randtopographie beim Schneiden und das Fügen der Ableiterfähnchen. Warum sind diese Merkmale für die Qualität der Zelle so wichtig? Der Trockenraum ist von der Leistung her für drei Personen im Raum ausgestattet, diese Anzahl darf nicht überschritten werden, da sonst Feuchtigkeit in die Zelle gelangen würde. Feuchtigkeit kann weiterhin durch die Anlieferung der Rollen in den Raum eingebracht werden. Die Zelle muss komplett wasserfrei sein, da sonst das Wasser mit dem Leitsalz (LiPF<sub>6</sub>) zu Flusssäure (HF) reagiert. Kriterien sind, dass eine Echtzeitmessung möglich ist und dass die Messung berührungslos erfolgt. Schwerpunkt ist die elektrische Leitfähigkeit der Elektroden. Nach diesen Kriterien wurden sieben Messmethoden zur Überprüfung ausgewählt, die Messung der Infrarot-Reflexion, die Messung der elektrischen Leitfähigkeit, die Messung der Dielektrizitätskonstanten, die Messung der Mikrowellen-Absorption, die Messung der Neutronenstreuung, die Messung der Luftfeuchte und die Wärmefluss-Thermografie. Hervorgegangen sind die Wärmefluss-Thermographie und die Infrarot-Reflexion. Beide Verfahren sind für den Separator und die Elektroden einsetzbar. Die Infrarot-Reflexion wird auch schon in der Folienindustrie angewendet, wonach schon positive Erfahrungen vorliegen. Der Feuchtegehalt im Zellstapel wird kurz nach der Durchtrennung der Separatorfolie und der Fixierung des Zellstapels gemessen.



Die Randtopografie muss nach dem Laserschnitt überprüft werden, da durch den Laserschnitt ein Grat an den Kanten entstehen kann. Die kritische Höhe darf nicht überschritten werden, da ein zu starker Grat an den Kanten, den Separator beschädigen könnte und sich damit die Elektroden berühren würden, was zu einem Kurzschluss führt. Nennenswerte Prüfverfahren sind: das Laser 2D Wegmesssensor Verfahren, die Streifenprojektion und die Fokusvariation. Bewährt hat sich der Laser 2D Wegmesssensor, da eine Online-Messung möglich ist und dieses Verfahren eine hohe Auflösung ausgibt.

Beim zerstörungsfreien Prüfen der Ableiterfährchen müssen intakte und nicht intakte Schweißverbindungen sicher erkannt werden, da bei starken Vibrationen bei der Autofahrt nicht intakte Schweißverbindungen aufbrechen können. Nennenswerte Verfahren sind die Ultraschallprüfung, das Lichtschnittverfahren und die Wärmefluss-Thermographie. Positiv hat sich die Wärmefluss-Thermographie hervorgetan, da in Echtzeit gemessen wird und Fehler in der Tiefe sicher erkannt werden. Die Überprüfung der fachgerechten Anschweißung der Ableiterfährchen wird kurz nach dem Laser-Remote-Schweißprozess kontrolliert.

Beim Laserschnitt gelangen Partikel auf die Oberfläche. Partikel ab einer Größe von 20  $\mu\text{m}$  können den Separator durchstechen. In der engeren Auswahl ist das Streiflicht Verfahren, das Shape from Shading, die Weißlicht-Interferometrie, der Laser 2D Wegmesssensor, das Verfahren mittels Thermographie und optische Prüfverfahren. Es wurde ein Versuch durchgeführt, der aufzeigt, welcher Einstrahlwinkel sich am besten für die Detektion und Vermessung eignet. Ein Einstrahlwinkel von 30° und 40° erwiesen sich am geeigneten. Bei einem Einstrahlwinkel von 10° warfen die Partikel einen zu großen Schatten, dies macht eine genaue Größenbestimmung der Partikel unmöglich, da der Partikel nicht genau vom Schatten unterschieden werden kann. Ab einem Einstrahlwinkel von 50° verschlechterte sich die Detektion der Partikel. Die Partikelerkennung kann optional als Eingangsprüfung kurz nach der Abwicklung der Rollen verwendet werden. Dies ist aber nicht unbedingt notwendig, da bevor die Folien aufgewickelt werden einer Endprüfung unterzogen werden. Platziert werden muss die Partikelerkennung aber kurz nach dem Laserschnitt, da

dort Spritzer vom Laserprozess auf die Oberfläche gelangen können, hier muss die Ober- und Unterseite beleuchtet werden.

## 5. Ausblick

Auf diesem Gebiet gibt es noch sehr viel zu forschen und weiter zu entwickeln. In den Prozess könnte zum Beispiel noch ein System zur Überprüfung der Wärmeeinflusszone integriert werden. Hierfür könnte die Thermografie genutzt werden.

Ein weiteres Beispiel wäre eine intelligente, defektselektive Auswahl des Zuschnittbereichs, anhand der Prüfung des Ausgangsmaterials. Ein Kamerasystem erfasst die Partikel auf der Elektrodenfolie. Die Elektrodenzuschnitte werden auf den fehlerfreien Bereich positioniert, dadurch werden nur fehlerfreie Elektroden geschnitten. Damit gäbe es weniger Ausschuss und die Ressourceneffizienz könnte gesteigert werden. [Abb.43]

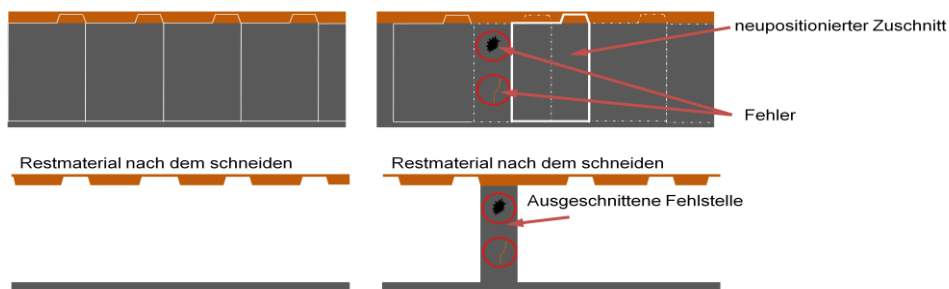


Abbildung 43: Intelligenter Zuschnitt  
Quelle: iwB, Fraunhofer IWU PG RMV

Weiterhin wäre eine bedarfsgerechte sensorgesteuerte Regelung der Reinigung von den Elektroden denkbar. Durch gezielten Einsatz punktueller Reinigungsverfahren für erkannte Schmutzpartikel könnte man die eingesetzten Reinigungsverfahren unterstützen oder sogar substituieren. Dies wäre zum Beispiel durch CO<sub>2</sub>-Schneestrahlen möglich. Damit würde eine energie- und ressourceneffiziente Reinigung angestrebt werden. [Abb.44]

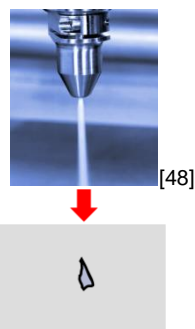


Abbildung 44: Punktueller Reinigung

## Anhang

I. Institutsprofil .....	74
I.I. Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik .....	74
I.II. Zahlen und Fakten .....	75
I.III. Projektgruppe „Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen“ .....	75
II. Grundlagen .....	76
II.I. Anfänge Elektroauto .....	76
II.II. CO <sub>2</sub> -Emissionen in Deutschland .....	77
II.III. Umfrage bei potentiellen Nutzern in Deutschland .....	78
II.IV. Ladekonzepte .....	80
II.V. Lithium Vorkommen .....	84
II.VI. Lithium Ressourcen .....	84
II.VII. Übersicht Batterien für Elektrofahrzeuge – Deutschland .....	86
II.VIII. Patente zu Lithium-Ionen-Zellen .....	87
II.IX. Produktspezifische Angaben zum Separator .....	88
II.X. Produktspezifische Angaben der Aluminiumfolie .....	88
II.XI. Produktspezifische Angaben der Kupferfolie .....	89
II.XII. Prozesskette .....	90
II.XII. Prozessdarstellung Flachwickeln .....	91
II.XIV. Prozessdarstellung Stapeln .....	92
II.XV. Prozessdarstellung Laminier-Z-Faltung .....	93
II.XVI. Prozessdarstellung Separator-Z-Faltung .....	94
II.XVII. Gewichtete Punktebewertung .....	95
III. Qualitätssicherung .....	96
III.I. Qualitätsrelevante Faktoren .....	96
III.II. Gewichtungsmatrix .....	101

III.III. Materialfeuchtemessverfahren .....	106
III.IV. Pflichtenheft Kantentopographie.....	108
III.V. Zerstörungsfreies Prüfen der Ableiterfähnchen .....	110
III.VI. Pflichtenheft Partikelerkennung .....	111
III.VII. Versuch vom 20.Januar 2011 .....	112
III.VII.I. Satz des Pythagoras.....	112
III.VII.II. Versuchsbilder zur Partikelerkennung an der Kathode.....	114
III.VII.III. Versuchsbilder zur Partikelerkennung an der Anode.....	115
III.VII.IV. Berechnung Partikelgröße.....	116

## I. Institutsprofil



### I.I. Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)

Das Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik ist seit rund 17 Jahren ein etabliertes Forschungs- und Entwicklungsinstitut mit dem Leitspruch „Forschung für die Zukunft“.

Im Fokus steht die anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Produktionstechnik für den Automobil- und Maschinenbausektor. Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung intelligenter Produktionsanlagen zur Herstellung von Karosserie- und Powertrain<sup>29</sup>-Komponenten und auf der Optimierung der damit verbundenen umformenden und spanenden Fertigungsprozesse.

Das IWU schafft neue innovative Lösungen zu durchgängigen Prozessketten, von Baugruppen bis hin zu komplexen Maschinensystemen und völlig neuen Kinematiken<sup>30</sup>. Unentbehrlich sind dabei die Leichtbaustrukturen und der Einsatz neuer Werkstoffe. Mechatronik und Adaptronik<sup>31</sup> sind Kernarbeitsgebiete zur Integration der Informations- und Kommunikationstechnologien in die Produktionstechnik.

Führende Stellung hat das Institut auf dem Gebiet der Mechatronik im Maschinen- und Automobilbau und in der Umformtechnik.

Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Präzisions- und Mikrotechnik.

Durch die zunehmende Ressourcenknappheit werden material- und energieeffiziente Technologien und Produkte entwickelt. [12]

---

<sup>29</sup> Antriebsstrang

<sup>30</sup> System aus starren Körpern, die durch Gelenke verbunden sind. Die Gelenke können unterschiedliche Freiheitsgrade haben. An den Gelenke befindet sich Sensorik zum Soll-/ Ist-Position-Vergleich.

<sup>31</sup> Kunstwort aus **adaptiv** und **Elektronik**. Befasst sich mit dem Aufbau adaptiver (selbstanpassender), aktiv reagierender mechanischer Struktursysteme. Die verwendeten Aktoren werden direkt in den Kraftfluss integriert und nutzen die elastomechanischen Eigenschaften der verwendeten Materialien aus.

## **I.II. Zahlen und Fakten**

Mit 392 hochqualifizierten Mitarbeitern, sowie Laboratorien für Werkzeugmaschinen, Umformtechnik, Mechatronik, Präzisionstechnik und virtuelle Realität<sup>32</sup> in Chemnitz, Dresden und Augsburg zählt das IWU deutschlandweit zu den bedeutendsten Auftragsforschungs- und Entwicklungseinrichtungen in ihren Fachgebieten.

Die Betriebsausgaben des Jahres 2009 beliefen sich auf 24,2 Millionen Euro, es entstanden 14,3 Millionen Euro als Personalaufwand und 9,9 Millionen Euro als Sachaufwand. Im Jahr 2009 bearbeitete das Institut insgesamt 549 Projekte, dabei wurden Investitionsmittel in Höhe von 4,6 Millionen Euro aufgewendet. Die sich durch die institutionelle Förderung des Bundes und der Länder sowie über Projekte finanzierten. [12]

## **I.III. Projektgruppe „Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen“ (RMV)**

Die Projektgruppe RMV wurde am 1. Januar 2009 in Augsburg gegründet. Betrachtet werden die Aspekte der Energie- und Materialeffizienz in der Produktion. Diese Projektgruppe verfolgt die Entwicklung von ressourceneffizienten Prozessen und Prozessketten, sowie funktionsintegrierte, mechatronische Komponenten und die mechatronische Systemintegration für die personal- und materialeffiziente Entwicklung und den kosteneffizienten Betrieb von Verarbeitungsmaschinen.

Verschiedene Projekte laufen in den Bereichen der Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen, in der Qualitätssicherung, flexible Datenerfassung und intelligente Produktionssysteme. [12]

---

<sup>32</sup> Digital generierte künstliche Welten.

## II. Grundlagen

### II.I. Anfänge Elektroauto

Am 29. April 1882 führte Werner von Siemens in Halensee bei Berlin auf einer 540 m langen Versuchsstrecke das erste Elektromobil vor - einen elektrisch angetriebenen Kutschenwagen, "Elektromote" genannt. Es war auch der erste Oberleitungsbus der Welt.



[104]

Werner von Siemens  
(1816-1892)



Abbildung 45: „Elektromote“  
Quelle: [144]



## II.II. CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland

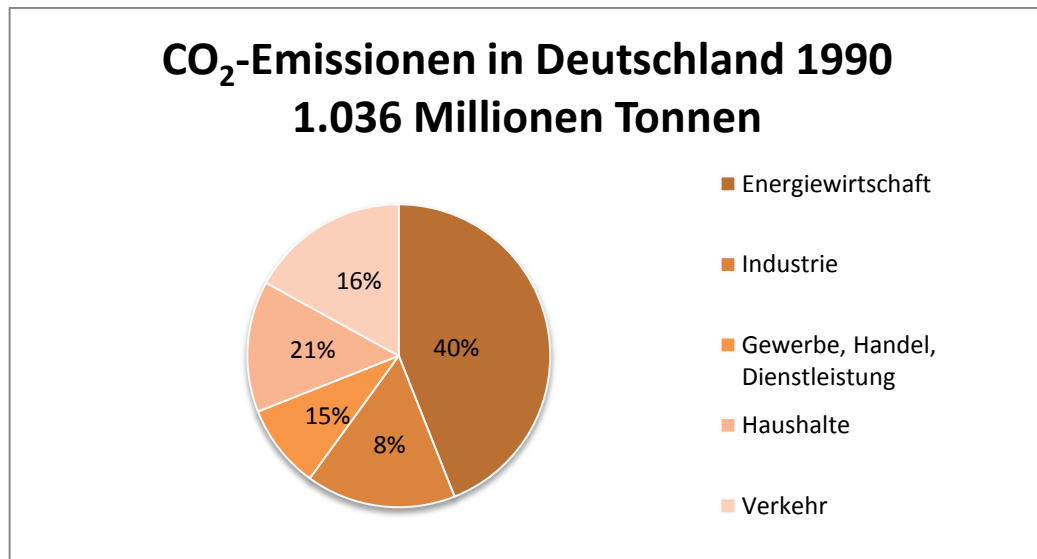


Abbildung 46: CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland 1990  
Quelle: [136]

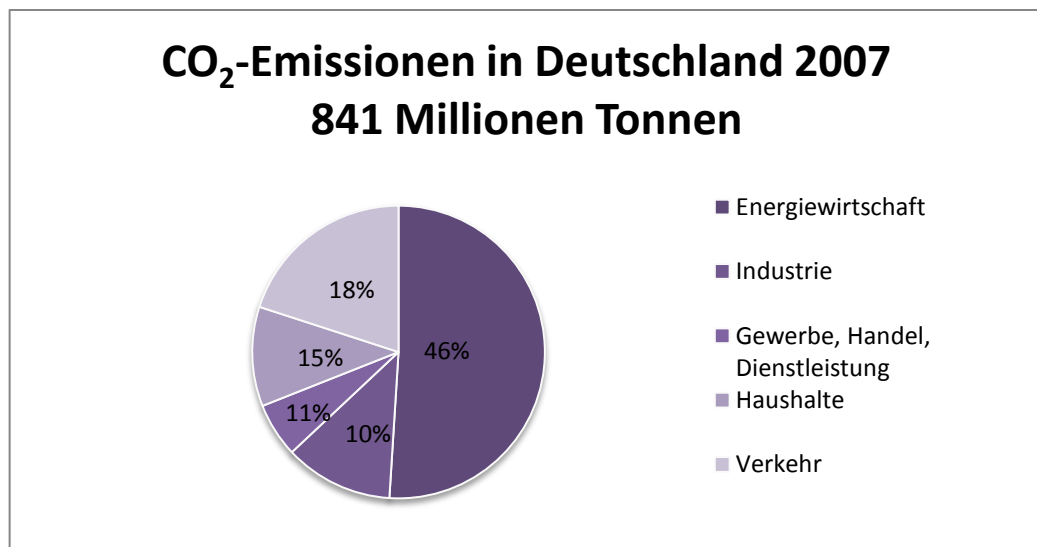


Abbildung 47: CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland 2007  
Quelle: [136]

### II.III. Umfrage bei potentiellen Nutzern in Deutschland

Deutsche sehen im Auto Stärke, Flexibilität, Schnelligkeit und Zuverlässigkeit. 87% der Befragten in einer Studie zum Mobilitätsverhalten der deutschen Bevölkerung aus dem Jahr 2005 waren der Ansicht, dass Mobilität nicht nur der Raumüberwindung dient, sondern ebenso Ausdruck des Lebensstils ist. 93% meinten sogar das Mobilität mit Freiheit verbunden ist. [16]

Natürlich kann das Elektroauto nicht in allen Punkten mithalten. Öffentliche Verkehrsmittel schränken unter anderem auch die Flexibilität und Schnelligkeit ein, trotzdem werden sie genutzt, vor allem weil sie umweltfreundlicher sind. Die Käufer können mit ökologisch reinem Gewissen fahren.

Experten von PricewaterhouseCoopers (PwC) hat in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) eine Studie mit potentiellen Nutzern durchgeführt. Jeder fünfte von den 18-70 jährigen Autofahrern ist Vielfahrer und legt pro Jahr mehr als 20.000 km mit dem Auto zurück. 17% sind Wenigfahrer und fahren im Jahr nicht mehr als 5.000 km. 42% sind vorwiegend auf Bundesstraßen unterwegs, gerade einmal 18% auf Autobahnen und 34% im Stadtverkehr. [22]

Ein durchschnittlicher PKW-Fahrer legt übers Jahr 80% der Tage weniger als 40 km zurück [16].

Rund 80% der Befragten meinen das durch den steigenden Benzinpreis, Elektroautos gute Marktchancen haben. 61% sehen das Elektroauto als typisches Stadtfahrzeug. [22]

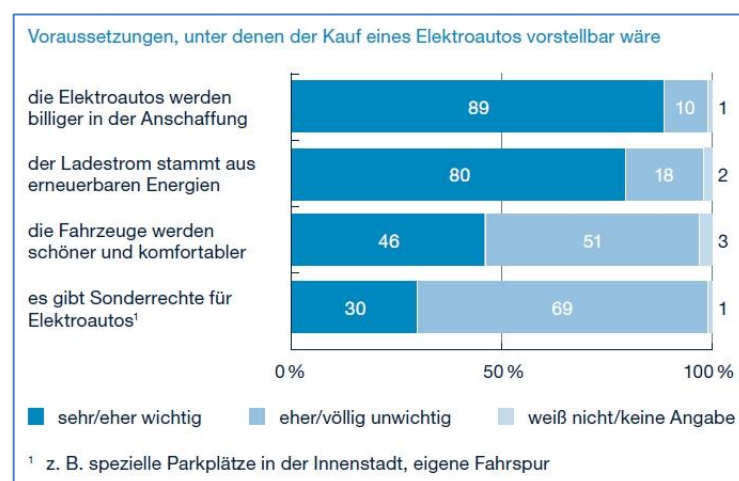


Abbildung 48: Voraussetzungen für den Kauf  
Quelle: [22]

Für 81% der Deutschen kommt ein Elektroauto zu diesem Zeitpunkt noch nicht infrage. Gründe dafür sind das sie noch zu teuer, nicht so leistungsstark und sie der Ansicht sind das Elektroautos ohne staatliche Subventionen keine Chance haben. Norwegen zum Beispiel gewährt den Käufern komplette Steuerbefreiung, in Österreich sind sie von der „Nova“ (einer erhöhten Steuer für Neuwagen) und der motorbezogenen Versicherungssteuer befreit. Japan erspart seinen Käufern die Mehrwertsteuer. [22]



Abbildung 49: Gründe gegen Elektroautos  
Quelle: [22]

Autofahrer von heute wissen sehr wenig über Elektroautos, was eine Umfrage zeigt. 61% sind der Meinung dass sie weniger wissen als der Durchschnitt und gerade einmal 9% denken viel darüber zu wissen [22]. Somit muss noch viel in der Öffentlichkeitsarbeit getan werden, um Elektroautos näher zu bringen.

## **II.IV. Ladekonzepte**

### **Normalladekonzept**

Aufladung an bereits bestehenden Stromanschlüssen zum Beispiel in Garagen. Vorteil ist, dass es sehr kostengünstig ist, der Nachteil die lange Aufladezeit der Batterie von circa 8 - 10 Stunden. Eigentlich nur dafür geeignet über die Nacht aufzuladen oder während der Arbeitszeit.

### **Schnellladekonzept**

Aufladung aus dem Hochspannungsnetz.

Vorteil: geringe Aufladezeit von circa einer Stunde. Der Nachteil ist, dass eine umfangreiche Veränderung der Netzinfrastruktur notwendig wäre.

### **Batteriewechselkonzept**

Bei Anzeige einer zu geringen Ladekapazität wird der Fahrer zur nächsten Aufladestation gebeten, wo sich diese befindet wird durch ein Navigationsgerät aufgezeigt. Dort wird erst einmal geprüft ob der Akku defekt ist, falls ja wird der defekte Akku in ein Seitenfach geschoben und mit einem neu geladenen Akku ausgetauscht.

Falls nicht wird der Akku in ein entsprechendes Rondell gebracht, es wird elektrisch verbunden und die Wiederaufladung beginnt. Das Rondell dreht sich und ein geladener Akku wird aus dem geöffneten Fach entnommen, zum Fahrzeug transportiert, dort eingeschoben, elektrisch verbunden und mechanisch fixiert.

Danach wird an einem Automaten die Rechnung beglichen.

Bei einer angenommenen Ladezeit von  $3 \frac{1}{2}$  Std. = 120 min und einem Rondell von 29 Fächern, ein Fach ist immer leer, ergibt sich somit eine Schrittfolge für die Weiterdrehung von  $(210 \text{ min} / 28 \text{ Fächer}) 7 \frac{1}{2} \text{ min}$ . [38]

Vorteile dieses Verfahrens sind: es ermöglicht eine schnelle Aufladung, unterschiedliche Akkutypen sind in unterschiedlichen Rondells möglich.

Nachteile sind vor allem der hohe Anspruch an die Konstruktion der Karosserie und der Zwang zum Neukauf einer neuen Batterie bei Ablauf der maximalen Ladeanzahl. Beim Neukauf eines Elektroautos ist die Batterie schon drin, es werden maximal 1.250 Ladungen angenommen. Jeder Ladevorgang wird durch einen Chip gezählt und angezeigt, so dass unabhängig welcher Akku gerade im PKW ist ein neuer gekauft werden muss.

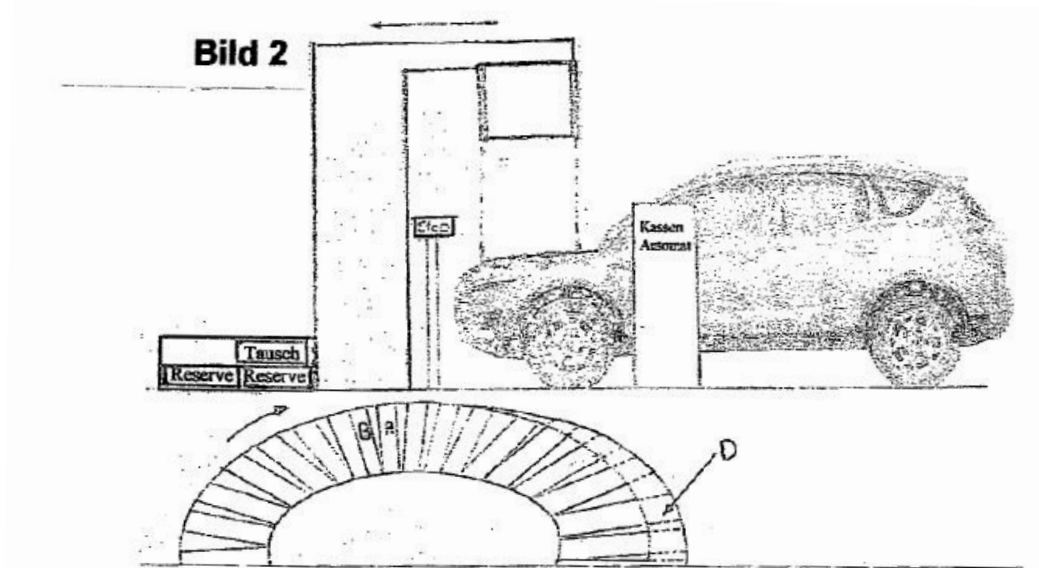


Abbildung 50: Batteriewechselkonzept  
Quelle: [38]

## Induktionsladung

Ist eine berührungslose Energieübertragung, die zum Beispiel auch Anwendung bei industriellen Transportsystemen, bei Kochherden oder bei elektrischen Zahnbürsten findet. Der Strom in einem Primärleiter erzeugt ein Magnetfeld, welches in einem Aufnehmer (Sekundärleiter) einen elektrischen Strom induziert.

Es sind zwei verschiedene Varianten in der Entwicklung. Einmal die Aufladung während der Fahrt und die zweite Methode ist durch Induktionsplatten, die man während des Parkens nutzen kann. Der größte Vorteil ist auf jeden Fall das während der Fahrt geladen werden kann. Der Nachteil ist das sich dieses Konzept nicht auf jeder Straße integrieren lässt (kostenintensiv), es würde sich für Autobahnen lohnen, wo längere Strecken gefahren werden.

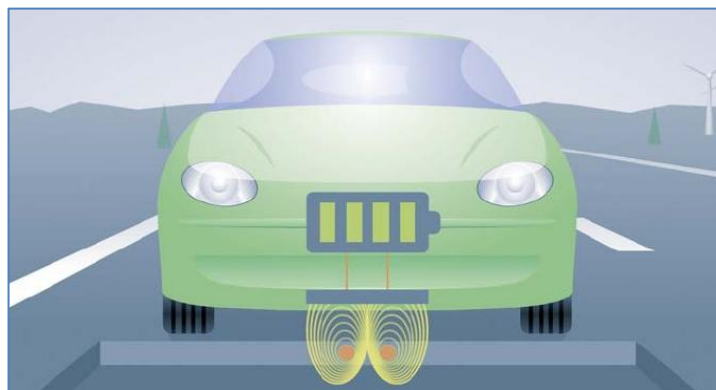
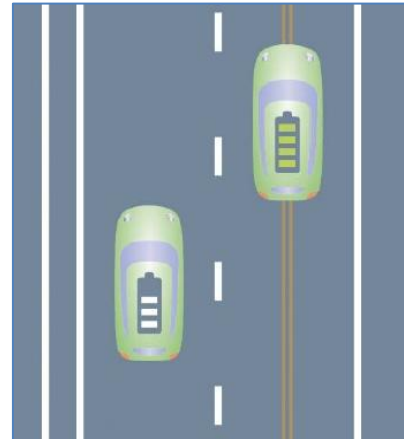


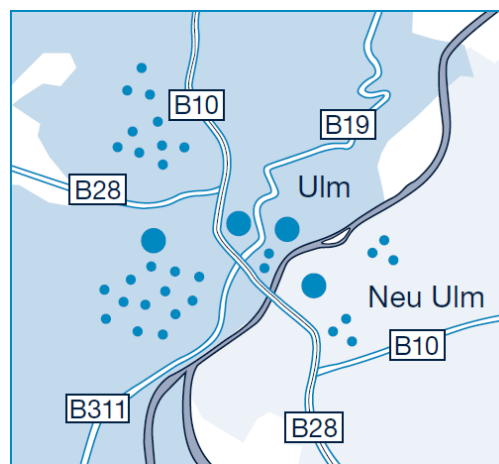
Abbildung 51: Induktionsladung  
Quelle: [18]

Die Firma WBT Datensysteme entwickelte für den Elektro-Kleinlieferwagen „EcoCarrier“ von EcoCraft-Automotive eine 1,5 qm große in den Boden eingelassene Ladeplatte und einem Stromabnehmer am Fahrzeugboden. Die mit Starkstrom geladene Platte enthält eine rund 50 m lange Kupferspule, die mit 16 oder 32 Ampere läuft und den über ihr abgestellten Wagen über ein Spannungsfeld mit Energie versorgt. [18]

## E-Carsharing

Diskutiert wurde unter anderem auch über das Konzept „E-Carsharing“<sup>33</sup>. Eine Elektromobile Carsharingflotte steht zum Beispiel an Flughäfen für Fluggäste bereit, um damit in die Innenstadt fahren zu können. Es bietet eine alternative zu teuren Taxen oder zum teuer geparkten eigenen Fahrzeug. Bereits 250 Elektrofahrzeuge würden ausreichen um circa 1.875 Fluggäste am Tag zur Innenstadt zu bringen (mit der Annahme, dass das Fahrzeug nach drei Stunden zurück zirkuliert und nach jeder dritten Fahrt eine Aufladung von rund drei Stunden erfolgt). Voraussetzung für dieses Konzept ist allerdings, dass ausreichend Parkplätze mit Ladestationen für den Flughafen und für zentrale Punkte in der Innenstadt vorhanden sind. [22] Der Vorteil an diesem Konzept ist das man Elektroautos den Leuten näher bringen kann, man kann spontan einsteigen, losfahren und dann das Auto wieder abstellen.

### Volldynamisches E-Carsharing an der Beispielstadt Ulm



- Parkplatz mit Ladesäule
- Parkfläche mit Ladestationen

Abbildung 52: E-Carsharing  
Quelle: [22]

---

<sup>33</sup> Engl. Elektroauto teilen

## II.V. Lithium Vorkommen

Der Salzsee mit der höchsten Konzentration aller bekannten Lagerstätten, ist der „Salar de Atacama“ in Chile, mit einer Länge von 100 km, 40 km Breite und bis zu 400 m Tiefe. Er ist an seiner Oberfläche eingetrocknet und von sechseckigen Steinplatten bedeckt. Ein bis Zwei Meter tief unter der Steinsalzkruste befindet sich eine 30 m mächtige Salz-



Abbildung 53: Salar de Atacama  
Quelle: [143]

schicht mit zahlreichen Poren. Diese wird von einer Lake durchströmt, welche 0,15% Lithium enthält. Die Lithiumlage wird in Solarteichen weiter konzentriert und mit Soda versetzt, so dass Lithiumcarbonat ausfällt, das gewaschen, gereinigt, getrocknet und für den Export verpackt wird. [5]

## II.VI. Lithium Ressourcen

Es wurde sehr viel über den Ressourcenverbrauch von Lithium diskutiert, ist genügend vorhanden? Wie lange wird es reichen? Für wie viele Akkumulatoren wird der natürliche Bestand ausreichen?

Lithium Ressourcen werden in LCE (Lithiumcarbonat-Äquivalente) angegeben, 5,32 kg LCE sind rund 1 kg Lithium. Weltweit identifizierte Ressourcen liegen zwischen 135 - 160 Millionen Tonnen LCE, vorwiegend in Südamerika. Dieses Vorkommen würde für 10 Milliarden Elektrofahrzeuge ausreichen und bei der aktuellen Produktion von circa 50 Millionen Fahrzeugen 200 Jahre lang (eine 20 kWh Batterie benötigt 0,8 kg LCE/kWh  $\approx$  150 g Li pro kWh). [30]



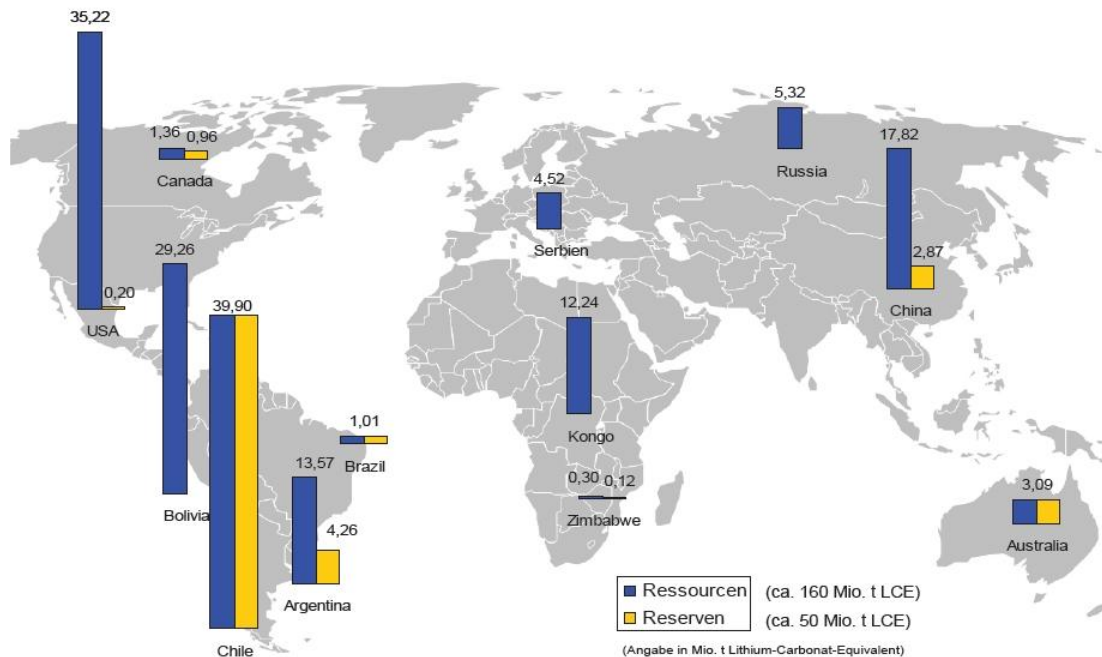


Abbildung 54: Aufteilung der identifizierten Reserven und Ressourcen  
 Quelle: [30]

### Abgrenzung Ressourcen und Reserven für mineralische Rohstoffe: [30]

**Ressourcen** bezeichnen die tatsächlich gemessene oder auch abgeschätzte Menge eines natürlich auftretenden festen, flüssigen oder gasförmigen Materials in oder auf der Erdkruste, aus der die ökonomische Gewinnung eines Rohstoffs heute oder zukünftig möglich ist.

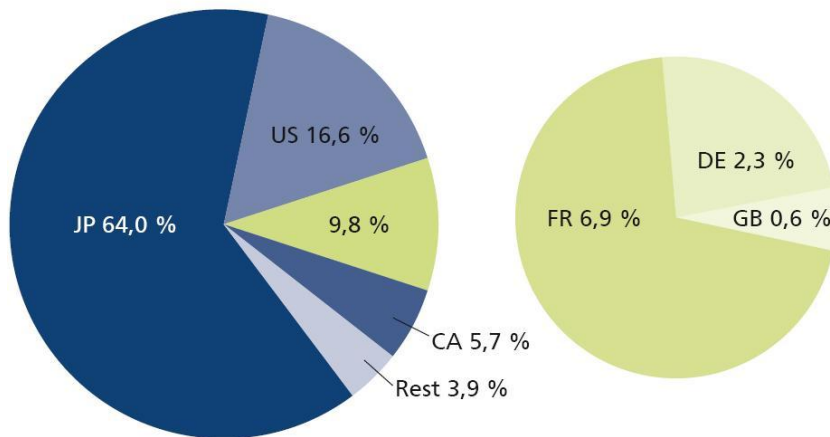
**Reserven** sind der Teil der Reservenbasis, der mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich gewonnen werden kann.

Als **Reservenbasis** wird der Teil der Ressourcen bezeichnet, der spezifische minimale physikalische und chemische Anforderungen, bezogen auf gegenwärtige Abbau- und Produktionsmethoden, erfüllt.

## II.VII. Übersicht Batterien für Elektrofahrzeuge - Standort Deutschland



Abbildung 55: Übersicht Batterien für Elektrofahrzeuge – Deutschland  
Quelle: [5]

**II.VIII. Patente zu Lithium-Ionen-Zellen****Patente zu Li-Ionen weltweit (1990–1994)**

CA Kanada  
CH Schweiz  
CN China  
DE Deutschland  
FR Frankreich  
GB Großbritannien  
JP Japan  
KR Südkorea  
US Vereinigte Staaten  
von Amerika

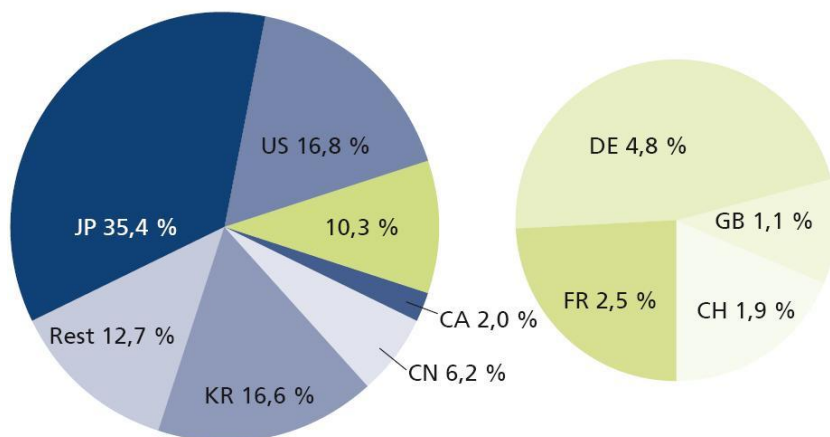
**Patente zu Li-Ionen weltweit (2005–2008)**

Abbildung 56: Patente zu Li-Ionen weltweit  
Quelle: [11]

## II.IX. Produktspezifische Angaben zum Separator

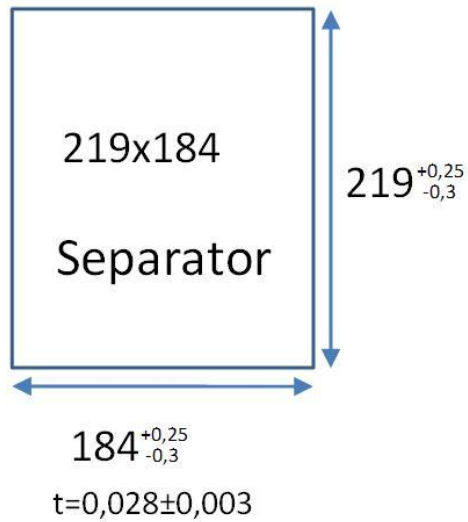


Abbildung 57: Abmessungen von Separator  
Quelle: *iwb*, IWU PG RMV

Material	Keramisches Vlies
Oberfläche	weiß
Zustand	trocken

Tabelle 7: Produktspezifische Angaben der Separatorfolie

## II.X. Produktspezifische Angaben der Aluminiumfolie

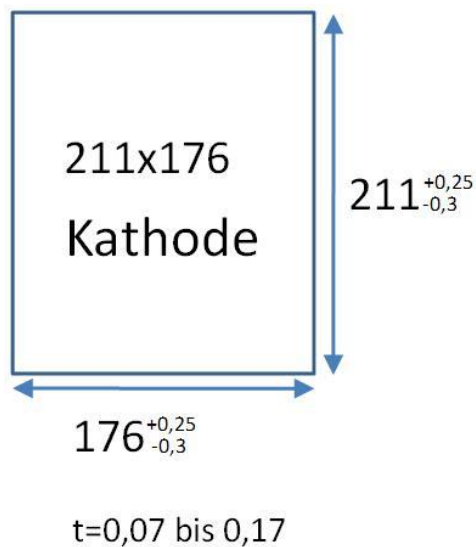
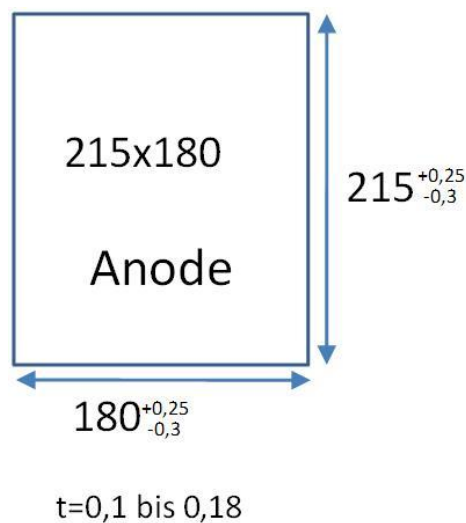


Abbildung 58: Abmessungen der Kathode  
Quelle: *iwb*, IWU PG RMV

Material	Aluminiumfolie/Kathodenblatt, beidseitig beschichtet
Dicke der Folie	10 bis 20 $\mu\text{m}$
Gesamtdicke	70 bis 170 $\mu\text{m}$
Flächengewicht	140 bis 400 $\text{g/m}^2$
Zugfestigkeit in MD	ca. 2 N/cm
Oberfläche	schwarz, matt bis glänzend
Zustand	trocken

Tabelle 8: Produktspezifische Angaben der beschichteten Aluminiumfolie

## II.XI. Produktspezifische Angaben der Kupferfolie

Abbildung 59: Abmessungen der Anode  
Quelle: iwib, IWU PG RMV

Material	Kupferfolie/Anodenblatt, beidseitig beschichtet
Dicke der Folie	10 bis 20 $\mu\text{m}$
Gesamtdicke	100 bis 180 $\mu\text{m}$
Flächengewicht	80 bis 250 $\text{g/m}^2$
Zugfestigkeit in MD	ca. 1 N/cm
Oberfläche	schwarz, matt bis glänzend
Zustand	trocken

Tabelle 9: Produktspezifische Angaben der beschichteten Kupferfolie

## II.XII. Prozesskette

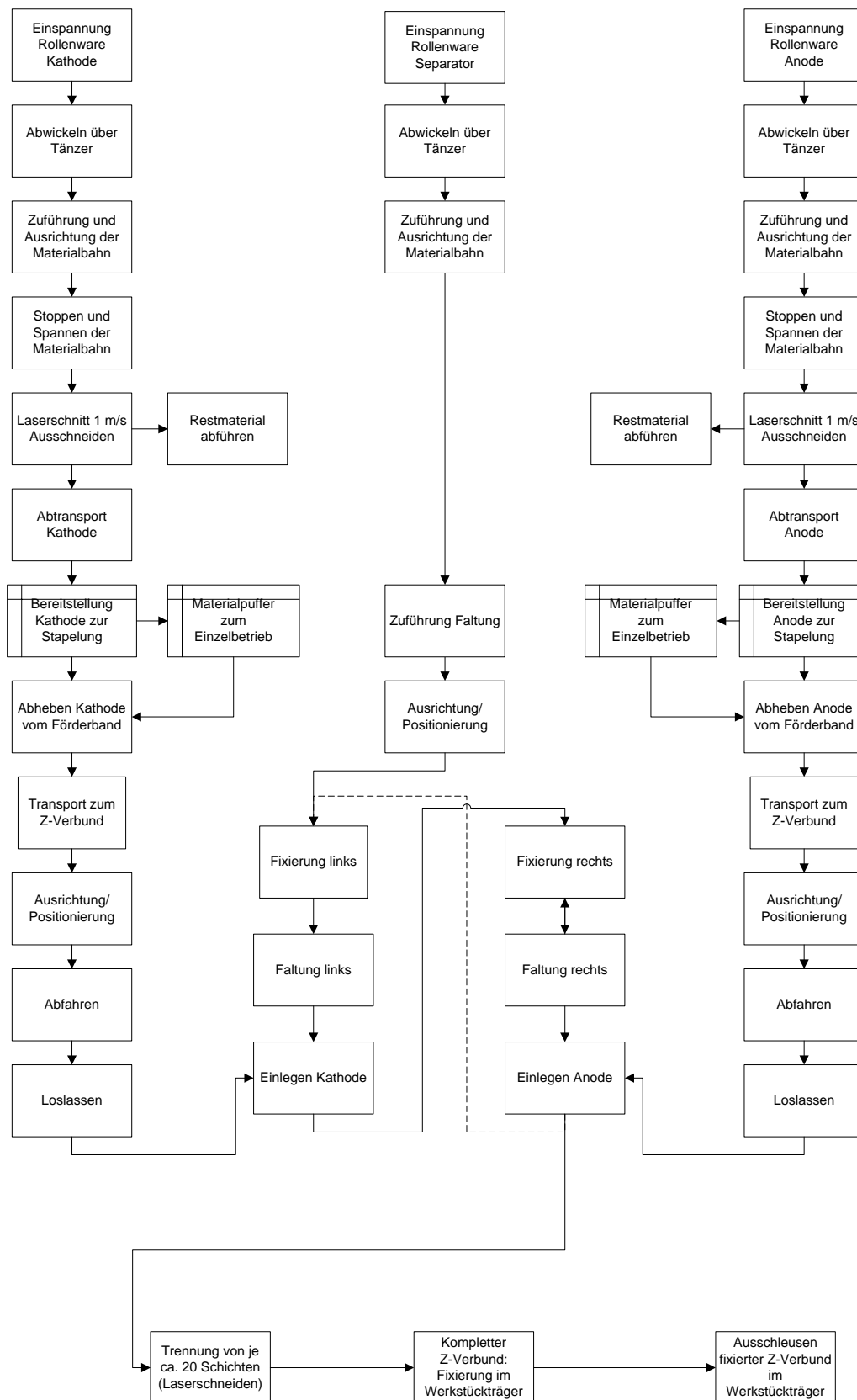


Abbildung 60: Prozesskette  
Quelle: iwv, IWU PG RMV

### II.XIII. Prozessdarstellung Flachwickeln

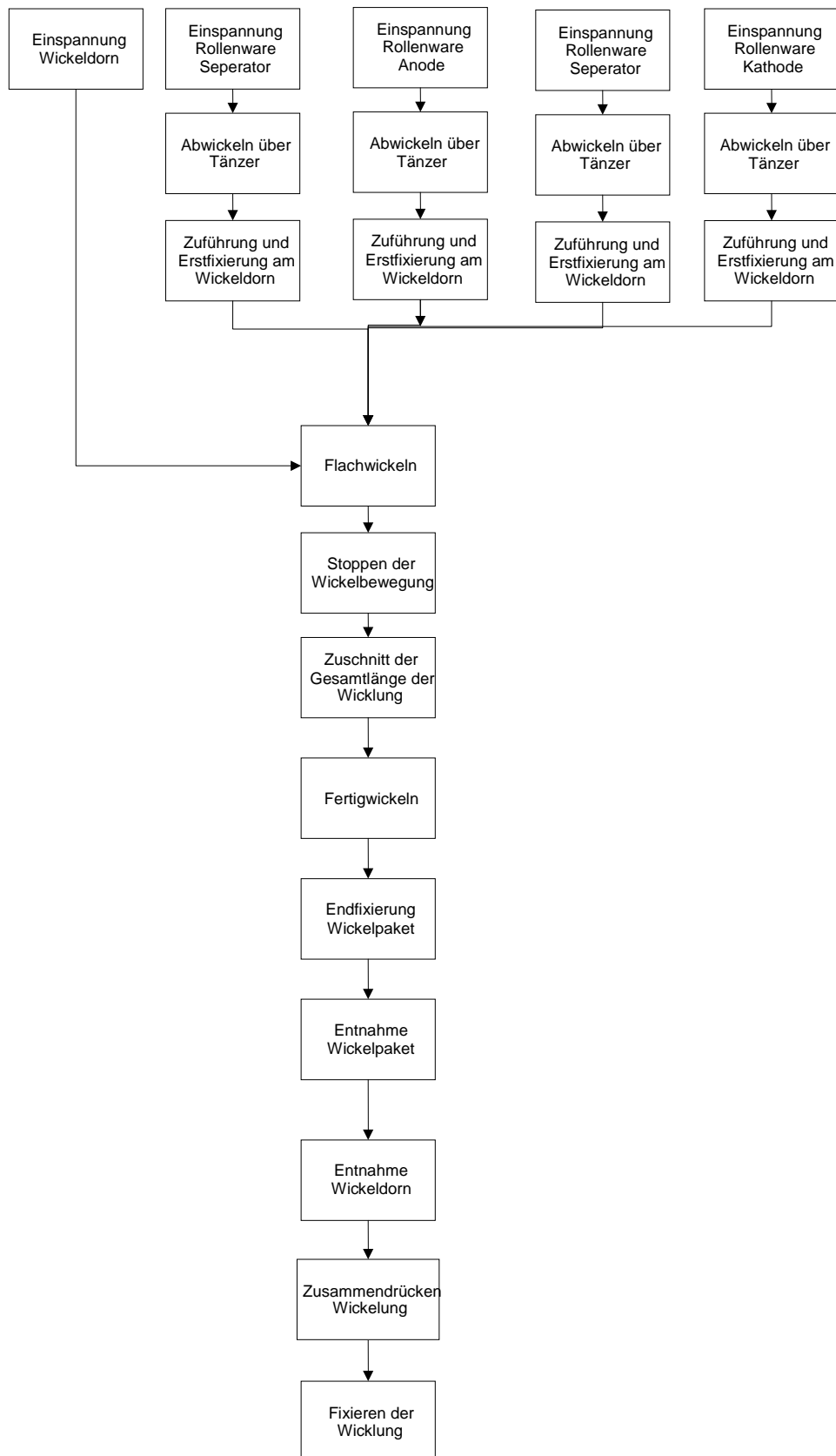


Abbildung 61: Prozessdarstellung Stapeln  
Quelle: *iwb*, IWU PG RMV

## II.XIV. Prozessdarstellung Stapeln

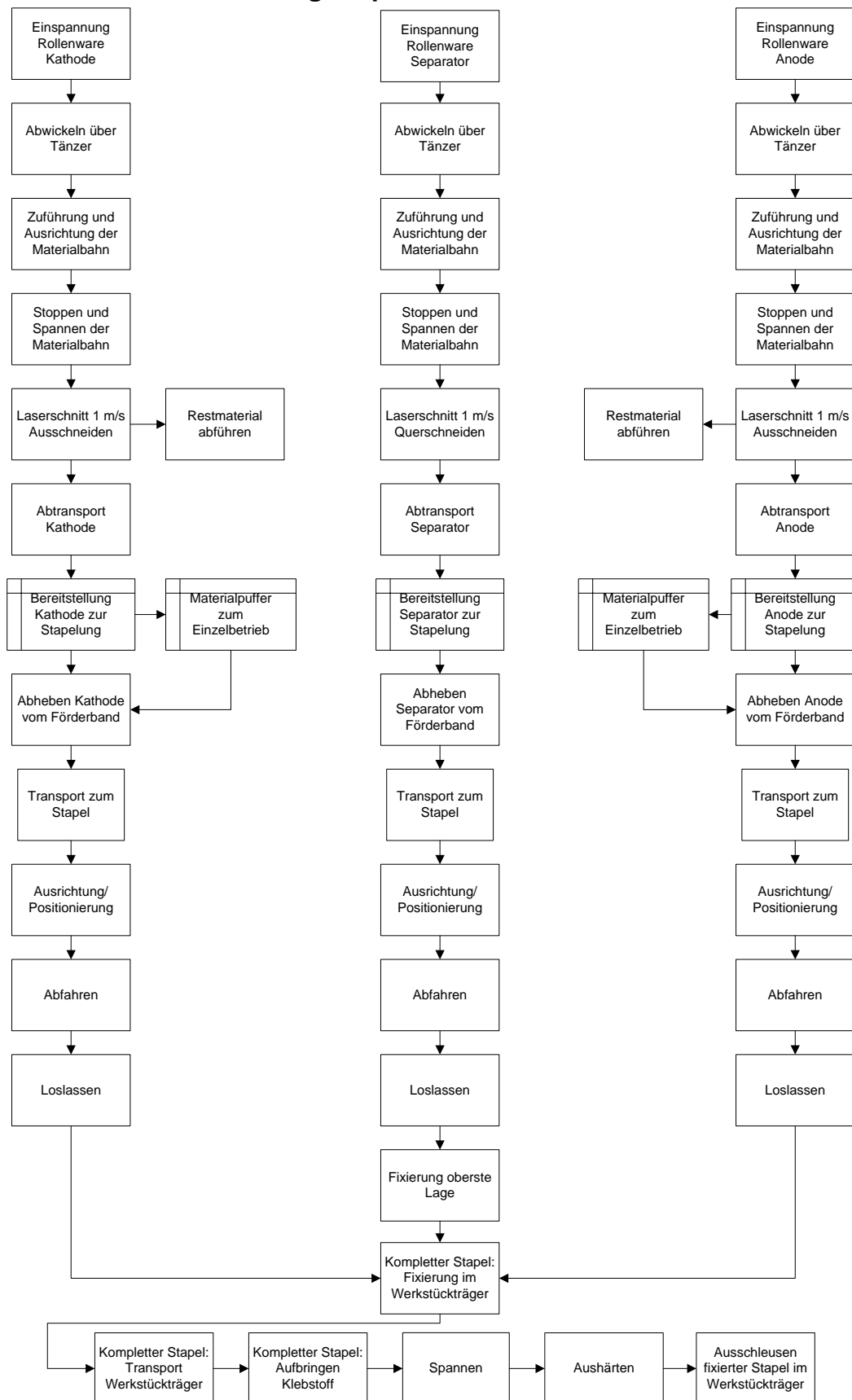


Abbildung 62: Prozessdarstellung Stapeln  
Quelle: iwB, IWU PG RMV



## II.XV. Prozessdarstellung Laminier-Z-Faltung

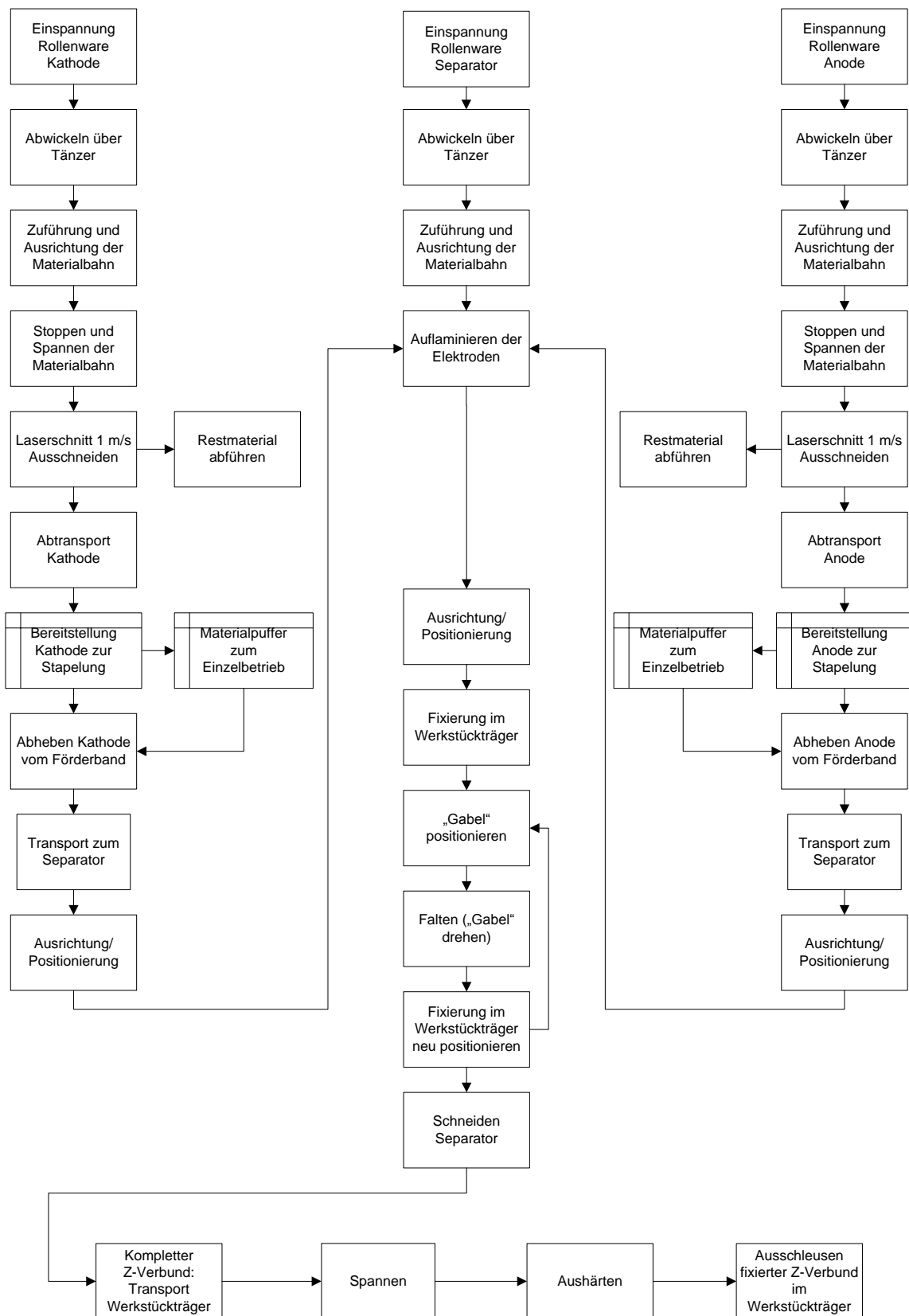


Abbildung 63: Prozessdarstellung Laminier-Z-Faltung  
Quelle: iwB, IWU PG RMV

## II.XVI. Prozessdarstellung Separator-Z-Faltung

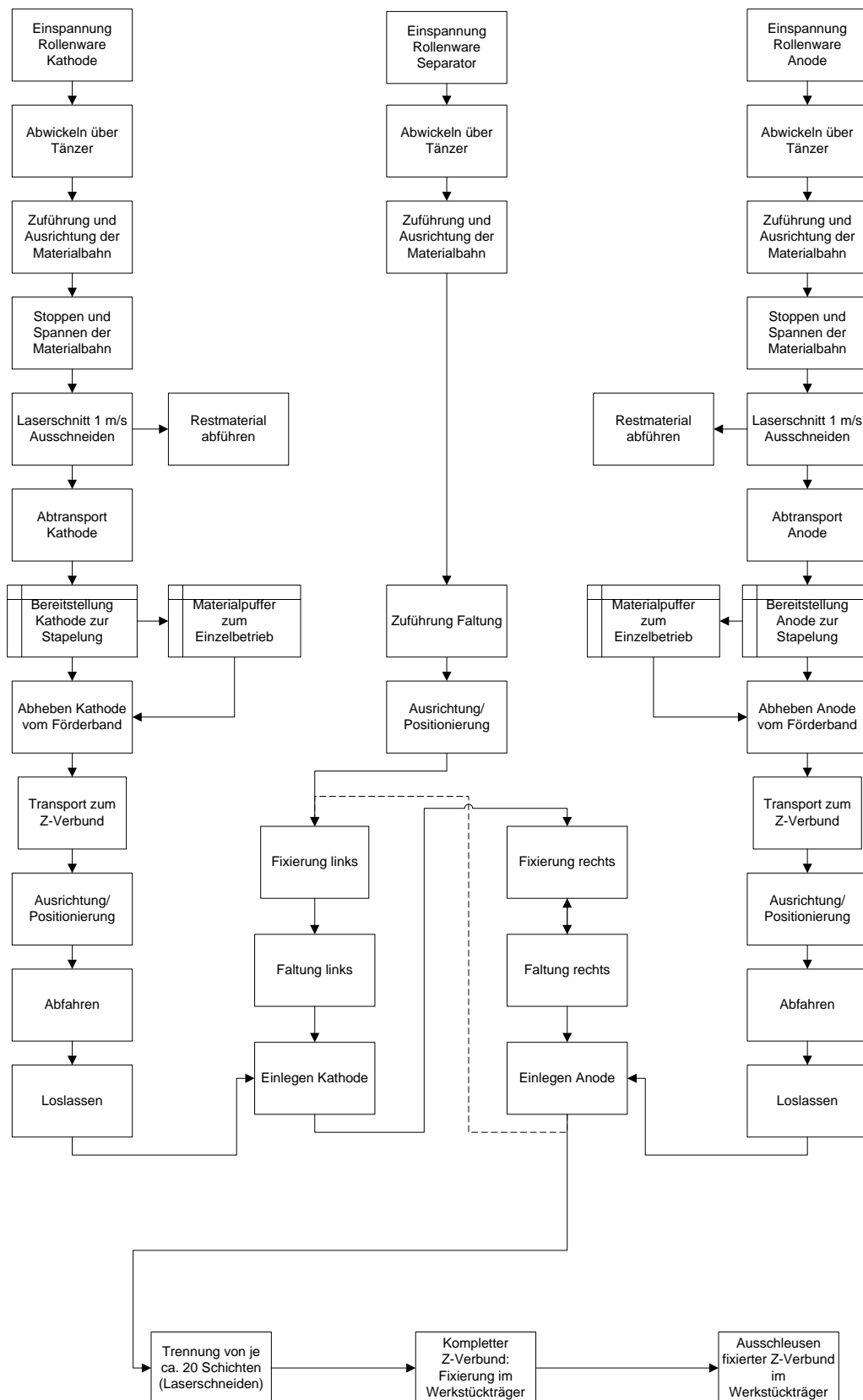


Abbildung 64: Prozessdarstellung Separator-Z-Faltung  
Quelle: iwv, IWU PG RMV

## II.XVII. Gewichtete Punktbewertung

		Punktebewertung 1-3-9				Gewichtung
		Stapeln	Flach- wickeln	Separator- Z-Falten	Laminier- Z-Falten	
Prozesseigenschaften	Produktqualität	9	1	3	3	5,00%
		3	9	3	1	2,50%
	Prozessicherheit	9	1	3	1	2,50%
		9	1	3	3	3,00%
		9	1	9	9	3,00%
		9	3	9	1	24,00%
	Wirtschaftlichkeit	1	9	3	3	12,00%
		9	3	3	3	3,00%
	Flexibilität	9	1	3	1	1,00%
		9	3	3	3	1,00%
	Einfluss auf Produkteigenschaften	9	1	9	3	8,00%
		9	1	9	3	4,00%
		9	3	9	9	6,00%
Forschungspotenzial	Anzahl initialer Forschungsideen	1	3	9	3	7,50%
	Neuheitsgrad	1	9	9	9	5,00%
	technische Herausforderung	3	1	9	1	12,50%
	Summe 1-3-9	6,14	3,39	7,2	2,99	100,00%
1 - nicht gut    3 - gut    9 - sehr gut		108	50	96	56	

Tabelle 10: Gewichtete Punktbewertung

### **III. Qualitätssicherung**

#### **III.I. Qualitätsrelevante Faktoren**

In den ersten drei Tabellen sind alle Einflussfaktoren nach den acht Prozessschritten dargestellt.

**Tabelle 14** zeigt die kritischen Einflussfaktoren auf, die während der Zellstapelung, dem Elektroden und Separator Zuschnitt auftreten könnten.

Prozess- schritt	Prozess	Qualitätseinflussfaktoren		Prüfprinzipien	Prüfverfahren	Sensorik
		im Prozess	im Produkt			
1	Zuführung von Träger- und Beschichtungsmaterialien	Bahnspannung, konstante Geschwindigkeit	Risse, Löcher, Falten, Beulen, Konsistenz des Beschichtungsmaterials	Chemisch, Induktiv-Elektrisch, Optisch	Eindringverfahren, Wechselstromfeldmessung, 3D-Speckle-Interferometer	Ultraschall-Sensor, Optoelektronische Distanzsensoren
	Beschichtung von Kathode / Anode mittels Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlage mit Rakelbeschichtung		Auftragsdicke, Homogenität, Haftung	Thermisch, Akustisch, Strahlend, Induktiv-Elektrisch	Magnetische Tomographie, Wechselstromfeldmessung, Thermographie (Lock-in-Thermografie) Mikrowellen-Reflexion	
2	Bereitstellung von Kathode / Anode / Separator		Risse, Löcher, Falten, Beulen, Sauberkeit, Identifikation fehlerhafter Bereiche	Optisch, Taktil, Chemisch, Induktiv-Elektrisch	Eindringverfahren, Wechselstromfeldmessung, 3D-Speckle-Interferometer, Bildverarbeitung, Lasertriangulation, Kraftmessung	
3	Zuschneiden von Kathode / Anode	Schnittgeschwindigkeit, Strahlleistung, Einstrahlwinkel, Fokus	Oberfläche (Spritzer, Abplatzungen, Delamination, Fremdpartikel), Kanten (Grat, Schnittwinkel, Sauberkeit, Welligkeit), Geometrie/Form (Toleranzen, Verzug, Ebenheit), Wärmeeinflusszonen	Optisch, Taktil, Chemisch, Induktiv-Elektrisch	Eindringverfahren, Wechselstromfeldmessung, 3D-Speckle-Interferometer, Bildverarbeitung, Lasertriangulation, Kraftmessung, Thermografie	

Tabelle 11: a) Qualitätsrelevante Faktoren

Prozess- schritt	Prozess	Qualitätseinflussfaktoren		Prüfprinzipien	Prüfverfahren	Sensorik
		im Prozess	im Produkt			
4	Handhabung und Stapelung der Zuschnitte		Handhabung (Beschädigung der Oberfläche, Vereinzelung der Stapelbereitstellung, Positionstoleranzen beim Aufnehmen, Handhabungskräfte), Stapelung (Beschädigung der Oberfläche, Positionstoleranzen beim Ablegen, Verschiebung der unteren Schichten, Reihenfolge-Überwachung, Vollständigkeit)	Optisch, Taktile	Bildverarbeitung, Lasertriangulation, Kraftmessung	Vision-Sensor, Induktive Sensor Optoelektronische Sensor Ultraschall-Sensor
5	Fixieren der Stapel		Prozesskräfte auf den Verbund, Beschädigung der Kanten	Optisch, Taktile	Bildverarbeitung, Lasertriangulation, Kraftmessung	Vision-Sensor
6	Fügen der Ableiter		elektrischer Kontakt (vorhanden, kritischer Widerstand)	Thermisch, Akustisch, Strahlend, Induktiv- Elektrisch	Magnetische Tomographie, Wechselstromfeldmessung, Thermographie	

Tabelle 12: b) Qualitätsrelevante Faktoren

Prozess- schritt	Prozess	Qualitätseinflussfaktoren		Prüfprinzipien	Prüfverfahren	Sensorik
		im Prozess	im Produkt			
7	Umhüllen der Elektrodenstapel		Füllmenge Elektrolyt, Luftrestmenge nach Evakuierung, Wareneingangsprüfung Folie, Dichtigkeitsprüfung	Optisch, Taktill	Bildverarbeitung, Lasertriangulation, Kraftmessung, Dichtigkeitsprüfung	kapazitive Ultraschall-Sensor, Micropulse Wegaufnehmer, Optoelektronische Distanzsensoren
8	Endprüfung		Funktionsprüfung, unzulässige lokale Erwärmung	Elektrisch	Test der elektrischen Leitfähigkeit, Impedanzspektroskopie, Stromspannungsmessung, Pulsverfahren	
Extra	Trockenraum	Luftfeuchtigkeit, Temperatur				Feuchtesensor, Temperatursensor

Tabelle 13: c) Qualitätsrelevante Faktoren

	Oberfläche Metallfolie	Oberfläche Beschichtung	Kanten	Form/Lage	Fügen	Endprodukt
Elektroden- zuschnitt	-Spritzer durch Laserzuschnitt -Partikel -Verunreinigung der Oberfläche -Dicke -Risse / Kratzer	-Spritzer durch Laserzuschnitt -Partikel -Abplatzungen -Delamination -Beschichtungsdicke -Homogenität des Beschichtungsmaterials -Risse	-Grat -Schnittwinkel -Kantenoberfläche -Stauchungen -Kontamination mit Beschichtung -Welligkeit	-Formtoleranzen -Längen- / Breitentoleranz -Ebenheit		
Separator- zuschnitt		-Risse / Kratzer -Spritzer durch Laserzuschnitt -Abplatzungen -Delamination -Partikel -Beschichtungsdicke -Homogenität des Beschichtungsmaterials	-Grat -Schnittwinkel -Kantenoberfläche -Welligkeit -Stauchungen -Kontamination mit Beschichtung	-Formtoleranzen -Längen- / Breitentoleranz -Ebenheit		
Zell- stapel				-Elektrodenlage (lateral) -Elektrodenlage (Winkel) -Separatorlage (lateral) -Separatorlage (Winkel)	-Schweißnaht	-Feuchtigkeit

Tabelle 14: Kritische Einflussfaktoren



## III.II. Gewichtungsmatrix

Halbzeug / Produkt	Qualitätsklasse	Qualitätsmerkmal	Relevanz	Pe	Fm	PdAf	Kt	Bks	Bsr	KPs
Material- zuführung	Bahnregelung	Bahnspannung	hoch						x	
		Linearität der Bahn	hoch					x		
Umwelt	Trockenraum	Temperatur	Stand der Technik							
		Luftfeuchtigkeit	Stand der Technik							

Pe - Partikelerkennung

Fm - Feuchtemessung

PdAf - Prüfung der Ableiterfähnchen

Kt - Kantentopographie

Bks - Bahnkantensteuerung

Bsr - Bahnspannungsregelung

KPs – Kameragestütztes Positionierungssystem

Tabelle 15: a) Gewichtungsmatrix

Halbzeug / Produkt	Qualitätsklasse	Qualitätsmerkmal	Relevanz	Pe	Fm	PdAf	Kt	Bks	Bsr	KPs
<b>Elektrodenzuschnitte</b>	<b>Oberfläche Beschichtung</b>	Risse	niedrig	x						
		Spritzer durch Laserzuschnitt	hoch	x						
		Abplatzungen	hoch	x						
		Delaminationen	mittel	x						
		Partikel	hoch	x						
		Beschichtungsdicke	hoch							
		Homogenität des Beschichtungsmaterials	niedrig							
		Verunreinigung der Oberfläche	hoch	x						
		Risse / Kratzer	niedrig	x						
		Spritzer	hoch	x						
	<b>Oberfläche Metallfolie</b>	Fremdpartikel	niedrig	x						
		Dicke	niedrig							
		Verunreinigungen der Oberfläche	hoch	x						
		Grat	hoch				x			
		Schnittwinkel	hoch				x			
	<b>Elektrodenkanten</b>	Kantenoberfläche	hoch				x			
		Welligkeit	niedrig							
		Abplatzungen	hoch	x						
	<b>Form / Geometrie</b>	Formtoleranzen	Stand d. Technik							x
		Längen- / Breitentoleranz	Stand d. Technik							x
		Ebenheit	Stand d. Technik							
	<b>Wärmeeinflusszone</b>	Materialveränderung Metallfolie	hoch							
		Materialveränderung Beschichtung	hoch							

Tabelle 16: b) Gewichtungsmatrix

Halbzeug / Produkt	Qualitätsklasse	Qualitätsmerkmal	Relevanz	Pe	Fm	PdAf	Kt	Bks	Bsr	KPs
Separatorzuschnitte	Oberfläche	Risse / Kratzer	hoch	x						
		Spritzer durch Laserzuschnitt	hoch	x						
		Abplatzungen	hoch	x						
		Delaminationen	hoch	x						
		Fremdpartikel	hoch	x						
		Beschichtungsdicke	hoch							
		Homogenität des Beschichtungsmaterials	hoch							
		Grat	niedrig				x			
	Separatorkanten	Schnittwinkel	niedrig				x			
		Kantenoberfläche	niedrig				x			
		Welligkeit	niedrig							
	Form / Geometrie	Formtoleranzen	Stand der Technik							x
		Längen-/Breitentoleranz	Stand der Technik							x
		Ebenheit	Stand der Technik							
	Wärmeeinflusszone	Materialveränderung Separatorfolie	mittel							
		Materialveränderung Beschichtung	mittel							

Tabelle 17: c) Gewichtungsmatrix

Halbzeug / Produkt	Qualitätsklasse	Qualitätsmerkmal	Relevanz	Pe	Fm	PdAf	Kt	Bks	Bsr	KPs
Zellstapel	Zellstapel	Folienreihenfolge	niedrig							x
		Umknicken Separator / Elektrode	niedrig							x
		Elektrodenlage (lateral)	hoch							x
		Elektrodenlage (Winkel)	hoch							x
		Separatorlage (lateral)	hoch							x
		Separatorlage (Winkel)	hoch							x
		Elektrischer Kontakt der Elektroden	hoch			x				
		Klebestreifen der in der Zelle verbleibt	niedrig							
Zwischen- produkt	Fixierung	Klebstoffe zur Fixierung	mittel							
		Füllmenge	Stand der Technik							
	Elektrolyt	Luftrestmenge	mittel							
		Vakuumverschweißen	mittel							
		Verunreinigungen	Stand der Technik							
	Umhüllungsfolie	Dichtigkeit	Stand der Technik							
		Elektrischer Kontakt der gefügten Ableiter	hoch			x				
	Ableiter									

Tabelle 18: d) Gewichtungsmatrix

Sensor	Funktion
Induktive Sensoren	Steuern, Positionieren und Kontrollieren von Prozessen in der Automatisierungstechnik
Kapazitive Sensoren	Zum Erkennen von - Objekten praktisch aller Materialien - Flüssigkeiten, Granulaten und Pulvern direkt oder durch eine Behälterwandung
Magnetfeld-Sensoren	Abfrage von Kolbenpositionen bei pneumatischen und hydraulischen Zylindern
Optoelektronische Sensoren	Prüfung von Anwesenheit, Form, Farbe, Distanz und Dicke
Vision-Sensoren	Zuverlässige Fehler- und Qualitätsprüfung
Mechanische Sensoren	Positionierung und Endabschaltung Werkzeugmaschinen
Ultraschall-Sensoren	Positionserfassung, Abstandsmessung, Erkennung fester, pulverförmiger und flüssiger Medien Erkennen von - Objekten praktisch aller, auch schalldämmender Materialien - Flüssigkeiten, Granulaten, Pulvern
Induktive Abstandssensoren	Position, Größe und Material eines metallischen Targets erkennen
Magneto-induktive Wegsensoren	Lineare, berührungslose Positionserfassung eines magnetischen Targets
Micropulse Wegaufnehmer	Messung langer Wege unter rauen Bedingungen, Füllstandskontrolle in Dosier- und Mischeinheiten
Optoelektronische Distanzsensoren	Positionieraufgaben, Materialflusskontrollen und Füllstandsabfragen in unterschiedlichsten Anwendungen, auch auf große Entfernung
Magnetband - Weg- und Winkelmess-Systeme	Präzise Positionierung in sehr dynamischen Anwendungen

Tabelle 19: Sensorarten

### III.III. Materialfeuchtemessverfahren

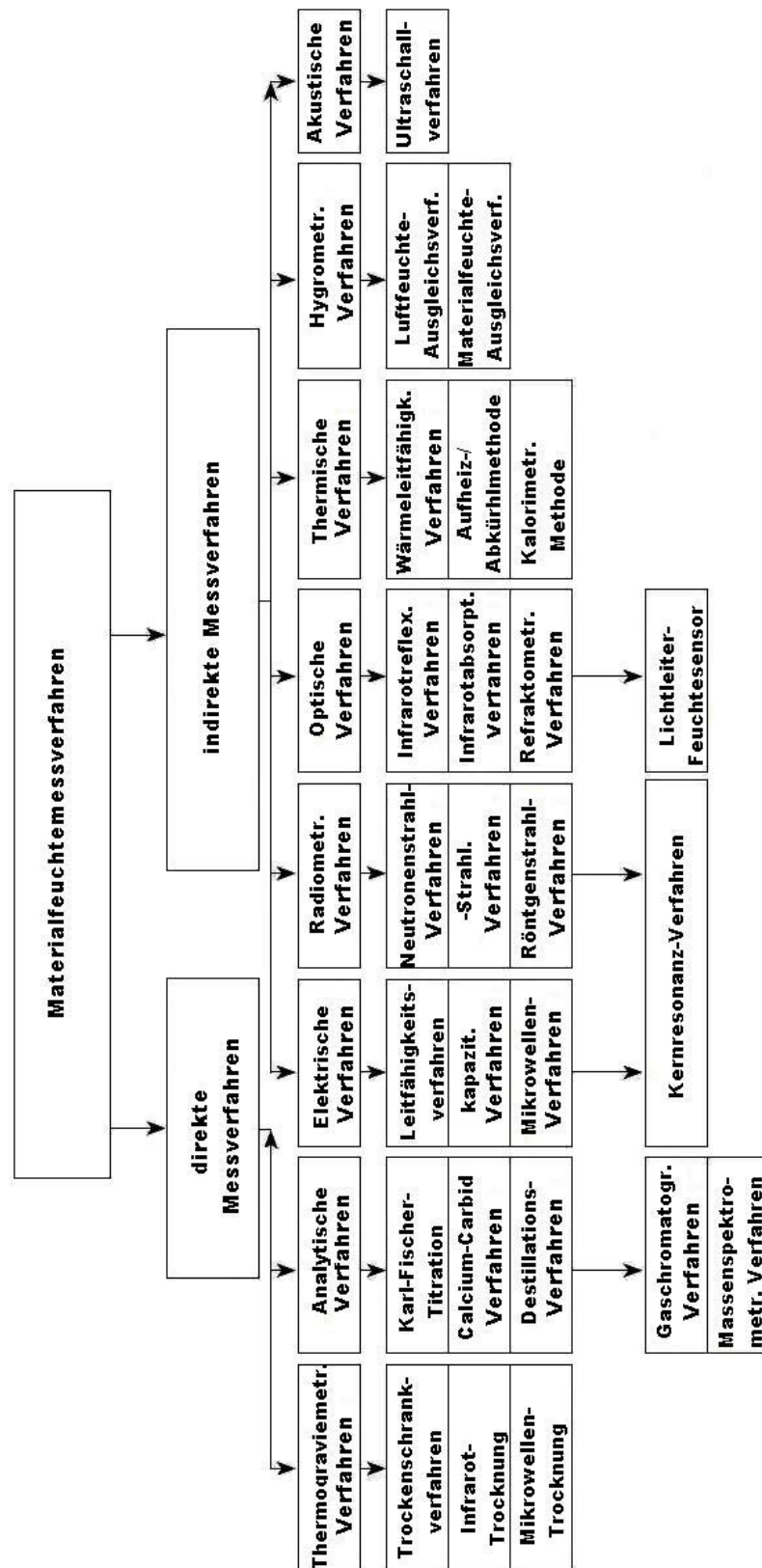


Abbildung 65: Materialfeuchtemessverfahren  
Quelle: [123]

## Charakterisierung der wesentlichen Online - Messverfahren für die Materialfeuchtebestimmung

Technische Ausführungen	Physikalisches Prinzip	Eigenschaften
Hochfrequenzsonden Mikrowellenmesstechnik Time-Domain-Reflektrometrie Frequenz-Domain-Reflektrometrie	Elektrischer Widerstand (Real-, Imaginärteil)	berührende Messung extrem kurze Messzeit Schüttdichteeinfluss Temperatur (typ. 120°C)
Kapazitive Gassensoren Psychrometer Zirkonoxidsonden Faserhygrometer Metalloxid Gassensoren Coulometrische Gassensoren Taupunktmessgeräte	Ausgleichsfeuchte/ Wasseraktivität	berührend, berührungslos im Material-/Gasstrom Temperatureinfluss Temperatur (typ. 120°C) Spurenfeuchtemessung Temperatur (typ. 80°C)
NIR- Messtechnik IR- Messgerät UV - Messtechnik Lichtwellenleiter - Hygrometer	Optische Verfahren	berührungslose Messung Hochtemperatureinsatz teilweise nur geringe Eindringtiefe ins Material
Temperaturmessung Druck-, Volumenstrommessung	Thermische Verfahren Wärmebilanz	berührend, berührungslos Hochtemperatureinsatz Errechnen der Feuchte
Mechanische Schwinger	Akustische Verfahren	Hochtemperatureinsatz Einsatz in verschmutzter Umgebung
Neutronensonden	Radiometrische Verfahren	geringe Bedeutung, hohe Sicherheitsanforderungen

Tabelle 20: Online-Messverfahren für die Feuchtebestimmung  
Quelle: [123]

**III.IV. Pflichtenheft Kantentopographie**

Taktgeschwindigkeit	circa 5 s für die Prüfung eines Zuschnitts circa DIN A5 Größe (215 x 180 mm <sup>2</sup> )
Bahngeschwindigkeit	300 mm/5 s → 60 mm/s → 3,6 m/min
Messart	Inline
Ziel	Erfassung der Topografie der Schnittkante, Erkennung von Grat, scharfen Kanten, die den Separator beschädigen könnten
Auflösung	20 µm
Messbreite	circa 10 mm
Messgeschwindigkeit	Für alle vier Kanten von einer Gesamtlänge von circa 1300 mm sollen 5 s benötigt werden. Bei einem Sensor 260 mm/s → 15,6 m/min
Oberflächenbeschaffenheit	Elektroden: schwarz, matt bis glänzend, Rand- bereiche Aluminium und Kupferfolie Separator: weiß Messung darf von glänzenden Randbereichen/ Schnittkanten nicht beeinflusst werden
Skalierbarkeit	Das System muss auf die industriellen Taktzei- ten/Bahngeschwindigkeiten hochskalierbar sein Die Skalierung muss technisch möglich sein
Randbedingung	Trockenraum

Tabelle 21: Pflichtenheft Randtopografie beim Schneiden



## Messprinzip Lasertriangulationsverfahren

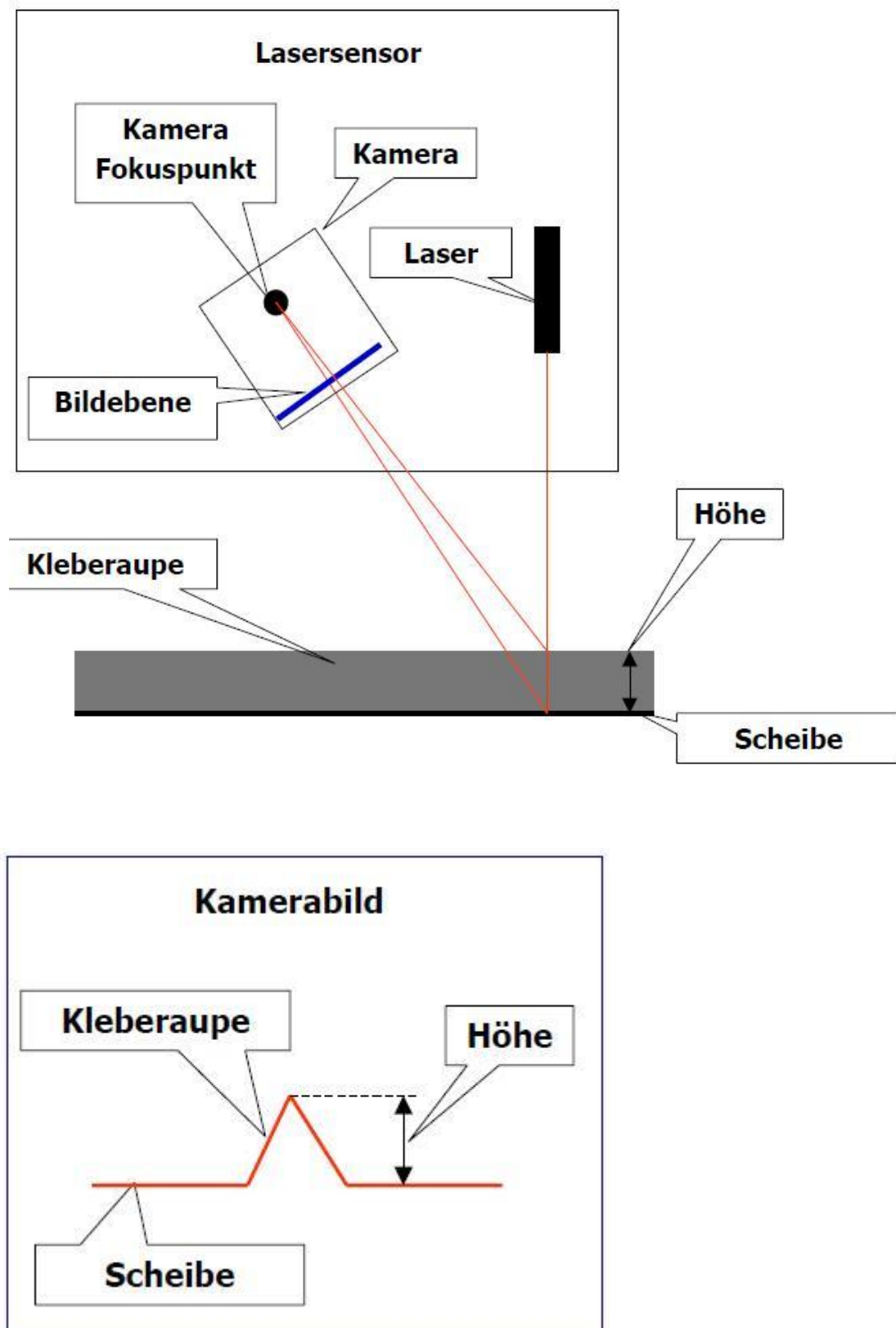


Abbildung 66: Lasertriangulationsverfahren  
Quelle: [125]

### III.V. Zerstörungsfreies Prüfen der Ableiterfährchen

	Optisch angeregte Lockin-Thermografie	Impuls-Thermografie (Blitzanregung)	Ultraschall-Thermografie	Induktions-Thermografie
<b>Fügeverbindungen</b>				
Klebeverbindungen	+	+	++	++
Schraubverbindungen	++	+	+	+
Nietverbindungen	+	+	++	+
Punkt-/Laserschweißungen	+	+	++	+
Clinchverbindungen	+	+	++	+
<b>Schichten</b>				
Lackdicke	+	++		
Haftung	+	++		
<b>Faserverbundwerkstoffe</b>				
Trennfolien	++	++		+
Schlagschäden	++	++	++	+
Delaminationen	+	+	++	+
Porosität	+	+		+
<b>Faserkeramik</b>				
Delaminationen	++	++	+	+
Risse	++	++	++	+
Inhomogenitäten	++	++		
Porosität	++	++		
<b>Metalle</b>				
Risse			++	+
Lunker			+	
Passungen			++	
<b>Faser-Metall-Lamine</b>				
Schlagschäden	+	+	++	+
Delaminationen	+	+	++	+
			++ gut geeignet	+ bedingt geeignet

Tabelle 22: Thermografie für die zerstörungsfreie Materialprüfung

**III.VI. Pflichtenheft Partikelerkennung**

Taktgeschwindigkeit	circa 5 s für die Prüfung eines Zuschnitts circa DIN A5 Größe (219 x 184 mm <sup>2</sup> )
Bahngeschwindigkeit	300 mm/5 s → 60 mm/s → 3,6 m/min
Messart	Inline
Ziel	Erkennung von Partikeln, Spritzer, Beschichtungsfehler, Löcher, Flecken und Rückständen
Partikelgröße	20 µm
Messbereichsbreite	220 mm
Oberflächenbeschaffenheit	Elektroden: schwarz ,matt bis glänzend, Randbereiche Aluminium- und Kupferfolie Separator: weiß Messung darf von glänzenden Randbereichen nicht beeinflusst werden
Auswertung	Es müssen auch Partikel, die die selbe Farbe wie der Hintergrund aufweisen sicher erkannt werden
Skalierbarkeit	Muss technisch möglich sein
Randbedingungen	Trockenraum

Tabelle 23: Pflichtenheft Partikelerkennung

### III.VII. Versuch vom 20.Januar 2011

#### III.VII.I. Satz des Pythagoras [26]

$$a^2 + b^2 = c^2$$

$$\sin \alpha = \frac{a}{c} = -$$

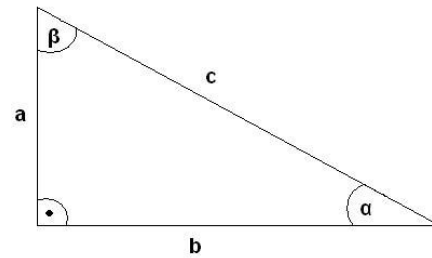


Abbildung 67: Rechtwinkliges Dreieck

#### Abstände:

$\alpha$	a	b
10°	2,5 cm	15 cm
20°	6 cm	15 cm
30°	8,7 cm	15 cm
40°	12,6 cm	15 cm
50°	17,8	15 cm
60°	26	15 cm

Tabelle 24: Abstandsmessungen

Satz des Pythagoras angewendet für die 10°:

$$\sin \alpha = \frac{a}{c} = \frac{2,5}{15} = 0,16$$

$$\underline{\underline{\alpha = 9,5^\circ \approx 10^\circ}}$$

Für die 20°:

$$\sin \alpha = \frac{a}{c} = \frac{6}{15} = 0,33$$

$$\underline{\underline{\alpha = 20,1^\circ \approx 20^\circ}}$$

Für die 30°:

$$\sin \alpha = \frac{a}{c} = \frac{8,7}{15} = 0,58$$

$$\underline{\underline{\alpha = 30,1^\circ \approx 30^\circ}}$$

Für die 40°:

$$\sin \alpha = \frac{\text{Geg.}}{\text{Hyp.}} = \frac{0,67}{0,81} = 0,84$$

$$\underline{\underline{\alpha = 40^\circ}}$$

Für die 50°:

$$\sin \alpha = \frac{\text{Geg.}}{\text{Hyp.}} = \frac{0,77}{0,64} = 1,19$$

$$\underline{\underline{\alpha = 49,9^\circ \approx 50^\circ}}$$

Für die 60°:

$$\sin \alpha = \frac{\text{Geg.}}{\text{Hyp.}} = \frac{0,87}{0,51} = 1,73$$

$$\underline{\underline{\alpha = 60^\circ}}$$

**III.VII.II. Versuchsbilder zur Partikelerkennung an der Kathode**

Kathode 10°



Kathode 20°



Kathode 30°



Kathode 40°



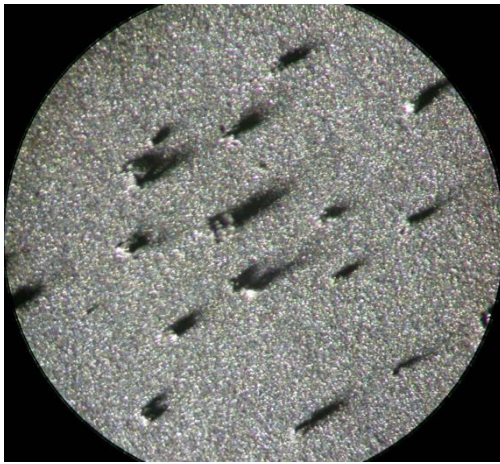
Kathode 50°



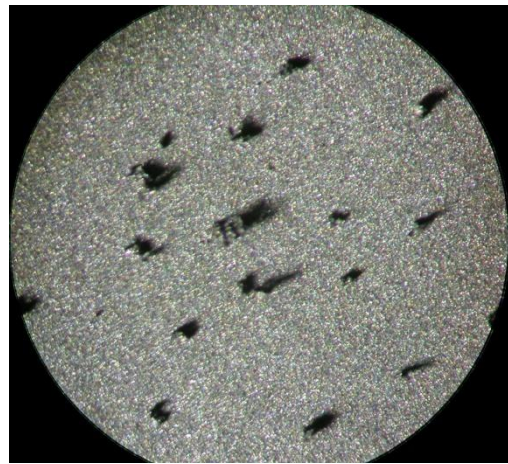
Kathode 60°

Abbildung 68: Versuchsbilder Kathode

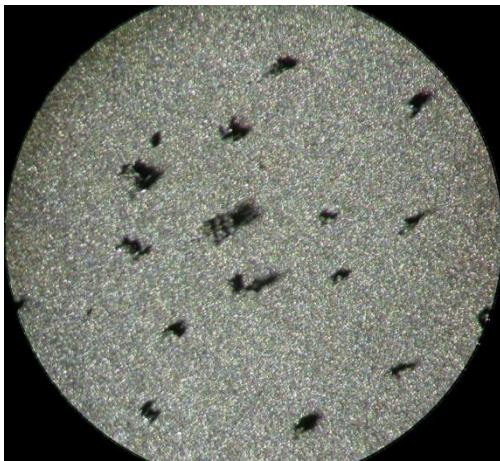


**III.VII.III. Versuchsbilder zur Partikelerkennung an der Anode**

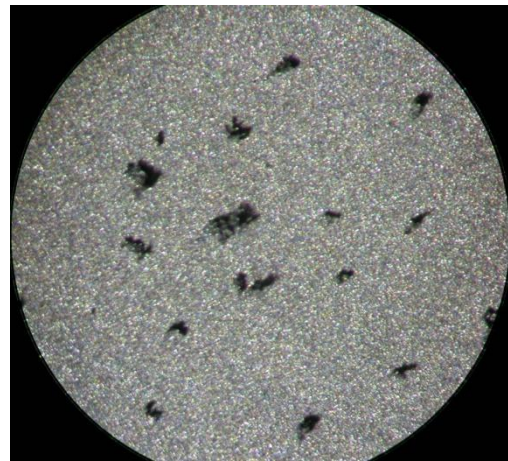
Anode 10°



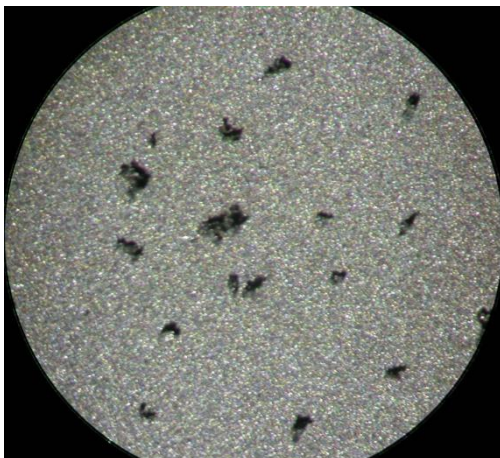
Anode 20°



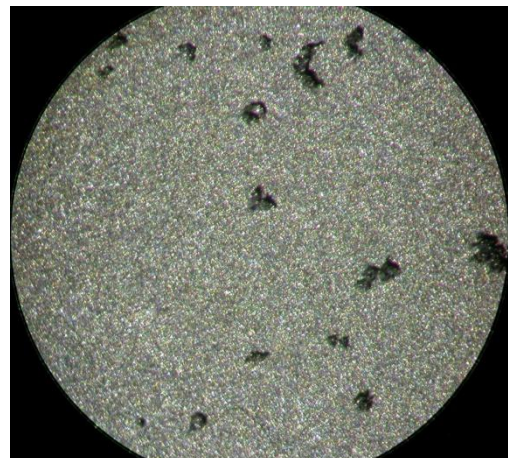
Anode 30°



Anode 40°



Anode 50°



Anode 60°

Abbildung 69: Versuchsbilder Anode

**III.VII.IV. Berechnung Partikelgröße**

Gegeben: Durchmesser = 3 mm = 3000 µm

Bildabmaß = 1860 x 1704 Pixel

Kleines Partikel = 34 Pixel

Großes Partikel = 126 Pixel

Gesucht: Partikelgröße von großem und kleinem Partikel in µm

Lösung:                      \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_ ≈ 1,6129

Kleines Partikel = 1,6129                      x 34 Pixel = 54,8 µm

Großes Partikel = 1,6129                      x 126 Pixel = 203,2 µm



## Literaturverzeichnis

- [1] ATZ 10: „VDI Kongress - Getriebe im Zeichen der Elektromobilität“  
Ausgabe: Oktober 210/112.Jahrgang, Seite 698-699  
Autor: Reichenbach, Michael
- [2] ATZ 11: „Aufwand und Nutzen von Elektroautos“  
Ausgabe: November 2010/112.Jahrgang, Seite 786, Seite 800-804
- [3] Automobil Produktion; Ausgabe 10/2010:  
„Wer fährt grüner?“, Autor: Michael Kömpf, Seite 50-51;  
„Deutschland macht (elektro)mobil“, Autor: Nikolaus Fecht, Seite 52-53;  
„Meet the future“, Autor: Egbert Schwartz, Seite 54-55
- [4] Blech - das Fachmagazin für die Blechbearbeitung: „Laser-Remote-Schweißen“  
Ausgabe 3/Juni 2009, Seite 26-27
- [5] Bundesministerium für Bildung und Forschung: "Elektromobil in die Zukunft - Batterieforschung als Schlüssel"  
Bonn, Berlin: 2010
- [6] Deutsch, Volker; Platte, Michael: „Ultraschallprüfung - Grundlagen und industrielle Anwendung“  
Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1997
- [7] Dietrich, Edgar; Schulze, Alfred: "Prüfprozesseignung - Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld"  
- 3.Auflage -  
München, Wien: Hanser Verlag, 2007
- [8] Dr. Wiesner Steuerungstechnik GmbH: „Grundlagenschulung Dichtheitsprüfung“
- [9] Dreyer, Georg: „Formelsammlung zur Festigkeitslehre und Elastizitätslehre“  
Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig, 1958
- [10] FAZ: „Staatsgeld für Daimler - Konzern bei Subventionen für Elektroautos an der Spitze“  
Ausgabe: 18.November 2010, Seite 16

- [11] Fraunhofer ISI: "Technologie-Roadmap - Lithium-Ionen-Batterien 2030"  
Karlsruhe: 2010
- [12] Fraunhofer IWU: „Innovationen für die Zukunft“  
Chemnitz: 2009
- [13] Gesellschaft für Bild- und Signalverarbeitung: „Lichtschnittsystem zur  
3D-Oberflächeninspektion“  
Prospekt, 2008
- [14] Grimme, Ralf; Schmauz, Günther: "Partscan: Inline-Detektion partikulä-  
rer Kontaminationen auf technischen Oberflächen"  
Prospekt, Fraunhofer IPA
- [15] Gruber, Paul; Pablo Medina: "Global Lithium availability: a constraint for  
electric vehicles?"  
University of Michigan: April 2010
- [16] Hamburgisches Welt Wirtschafts Institut: "Mobilität - Strategie 2030"  
Hamburg: 2009
- [17] Hanser Automotive  
Ausgabe Oktober 2010, Jahrgang 9
- [18] Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr: "Elektromobilität - Strom aus  
der Straße -Induktive Energieübertragung auf dem Weg ins Fahrzeug"
- [19] Keferstein, Claus; Dutschke, Wolfgang: "Fertigungsmesstechnik - Pra-  
xisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren" - 6.Auflage -  
Wiesbaden: Teubner Verlag, 2008
- [20] Loullingen , Claude; Diplomarbeit: "Lagebestimmung mit Hilfe eines  
3D-Oberflächenscanners"  
Universität Karlsruhe: Mai 1998
- [21] Pfeifer, Tilo; Schmitt, Robert: "Handbuch Qualitätsmanagement"  
- 5. Auflage -  
München: Carl Hanser Verlag, 2007
- [22] PwC; Fraunhofer IAO: "Elektromobilität - Herausforderungen für Indust-  
rie und öffentliche Hand"  
Frankfurt: 2010

- [23] Riegert ,Gernot; Diplomarbeit: "Induktions-Lockin-Thermografie - ein neues Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung"  
Universität Stuttgart: März 2007
- [24] Rohstoff Report: „Leitartikel der Woche: Lithium“  
6.Jahrgang, 20. Ausgabe, 29.09.2009
- [25] Roters, Peter: „Energietechnische Formelsammlung“  
Troisdorf: Bildungsverlag EINS Stam, 2000
- [26] Tafelwerk: „Das große Tafelwerk“  
Berlin: Cornelsen Verlag, 2003
- [27] TUM Campus: "Elektroautos: Auf den Strom kommt's an"  
Ausgabe: 3/2010, Seite 14-15  
Autor: Gohla-Neudecker, Bodo:
- [28] Umweltbundesamt: „Schaubilder zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen in Deutschland 1990 - 2007“  
Dessau-Roßlau: Mai 2009
- [29] Wendl, Matthias; Diplomarbeit: "Abschätzung des künftigen Angebot-Nachfrage-Verhältnisses von Lithium vor dem Hintergrund des steigenden Verbrauchs in der Elektromobilität"  
Karlsruhe: Oktober 2009
- [30] ZSW: "Lithium - begehrter Rohstoff der Zukunft - Verfügbarkeitsanalyse"  
Ulm: 2010

### **DIN-Normen**

- [31] DIN EN ISO 10012: „Messmanagementsysteme- Anforderungen an Messprozesse und Messmittel“
- [32] DIN 54190-1: „Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen“
- [33] DIN 54190-2: „Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Teil 2: Geräte“

- [34] DIN 54190-3: „Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Teil 3: Begriffe“
- [35] DIN EN 1779: „Dichtheitsprüfung - Kriterien zur Auswahl von Prüfmethoden und -verfahren“
- [36] DIN EN ISO 9000-3: „Normen zum Qualitätsmanagement und zur Qualitätssicherung/QM-Darlegung - Teil 3: Leitfaden für die Anwendung von ISO 9001“
- [37] DIN EN ISO 9001: „Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen“

### **Patente / Offenlegungsschriften / Gebrauchsmusterschriften**

- [38] Schutzrecht DE 20 2009 013 562 U1 (06.05.2010);  
Dipl.-Ing. Wilfried Simmank:  
"Station zum automatischen Wechseln von Lithium-Ionen-Akkumulatoren -oder anderen- in Fahrzeugen mit Elektroantrieb"  
Pr.: 20 2009 013 562.4 09.10.2009
- [39] Schutzrecht WO 2010/040520 A2 (15.04.2010);  
FEV Motorentechnik GmbH:  
"Lithium-Ionen-Batterie"  
Pr.: PCT/EP2009/007202 07.10.2009
- [40] Schutzrecht WO 2008/083920 A2 (17.07.2008);  
Robert Bosch GmbH:  
"Elektrodenpack einer elektrochemischen Zelle sowie elektrochemische Zelle mit einem Elektrodenpack"  
Pr.: PCT/EP2007/064500 21.12.2007
- [41] Schutzrecht DE 10 2007 027 666 A1 (18.12.2008);  
Robert Bosch GmbH:  
"Additive für Lithium-Ionen-Akkumulatoren"  
Pr.: 10 2007 027 666.6 15.06.2007
- [42] Schutzrecht DE 20 2008 063 136 A1 (17.09.2009);  
Daimler AG:  
"Verfahren und Vorrichtung zum Schutz einer Lithium-Ionen-Batterie in einem Fahrzeug"  
Pr.: 10 2008 063 136.1 24.12.2008

- [43] Schutzrecht EP 0 795 946 A2 (17.09.1997);  
Siliconix:  
"Rapid charging technique for Lithium ion batteries"  
PR.: 97 104 104.1 17.09.1997
- [44] Schutzrecht EP 0 865 091 A2 (16.09.1998);  
Varta Batterie AG:  
"Laminierte Lithium-Ionen-Zelle und Verfahren zu ihrer Herstellung"  
Pr.: 98 102 041.5 06.02.1998

## Messen

- [45] Produktionskongress am 6.Oktober 2010 in München
- [46] Parts2clean am 12.-14.Oktober 2010 in Stuttgart

## Internet

- [47] 3D-Shape GmbH: „Weißlicht-Interferometer“  
[http://3dshape.de/up\\_down\\_load/prospekte/korad3d\\_d.pdf](http://3dshape.de/up_down_load/prospekte/korad3d_d.pdf);  
abgerufen am 19.November 2010
- [48] Acp GmbH: „CO<sub>2</sub>-Schneestrahlnreinigung“  
<http://www.acp-micron.com/5699-CO2-Schneestrahln-Reinigung.html>;  
abgerufen am 15.Dezember 2010
- [49] ADAC: "Die DBM-Rekordfahrt: „Reaktionen aus Industrie und Wissenschaft"  
<http://adacemobility.wordpress.com/2010/12/10/die-dbm-rekordfahrt-reaktionen-aus-industrie-und-wissenschaft/>;  
„Das Wunder von Berlin - die Rekordfahrt von DBM und Lekker Energie mit einem Elektroauto“  
<http://adacemobility.wordpress.com/2010/10/26/das-wunder-von-berlin/>;  
abgerufen am 03.Januar 2011
- [50] Alicona: "Fokusvariation"  
<http://www.alicon.com/home/products/portable/Portable.de.php>;  
abgerufen am 15.Dezember 2010

- [51] All about test: "Messsystem für Batterie- und Brennstoffzellen-Stacks"  
<http://www.all-about-test.info/bauteile/745-messsystem-fuer-batterie-und-brennstoffzellen-stacks.html>  
abgerufen am 14.Dezember 2010
- [52] All about test: "Spatenstich für einzigartiges Batterietechnologie-Labor"  
<http://www.all-about-test.info/allgemein/766-spatenstich-fuer-einzigartiges-batterietechnologie-labor.html>;  
abgerufen am 16.September 2010
- [53] Alternativ-fahren: "DIN-Norm für zukünftige Elektrofahrzeuge?"  
<http://www.alternativ-fahren.de/aktuelles/elektrofahrzeuge/din-norm-elektroauto-ladestecker.html>;  
abgerufen am 13.September 2010
- [54] Alternativ-fahren: "Elektroantrieb - Energie aus der Steckdose (Auto-strom)"  
<http://www.alternativ-fahren.de/elektroauto.html>;  
abgerufen am 13.September 2010
- [55] Alternativ-fahren: "Elektromobilität: Einheitliche Systeme in Europa"  
<http://www.alternativ-fahren.de/aktuelles/elektrofahrzeuge/elektroauto-einheitliches-ladesystem-in-europa.html>;  
abgerufen am 13.September 2010
- [56] Alternativ-fahren: " Standardladung: Autostrom Tanken mit 220/230 Volt "  
<http://www.alternativ-fahren.de/elektroauto/ladesysteme/216-standardladung-autostrom-tanken-mit-220230-volt.html>;  
abgerufen am 17.November 2010
- [57] Alternativ-fahren: "Staatliche Förderung könnte die Elektromobilität zum Erfolg führen"  
<http://www.alternativ-fahren.de/aktuelles/elektrofahrzeuge/rwe-autostrom-pilotprojekt-hamburg.html>;  
abgerufen am 11.Oktober 2010
- [58] AmsTech: „Ultraschallprüfung“  
<http://www.amstech.nl/Downloads/doc/Mini%20Scanner%20Broschure.pdf>  
abgerufen am 15.Dezember 2010

- [59] Ateq: „Elektrisches Hochleistungs-Lecktestgerät“  
<http://www.ateq.de/getfile.php?id=260>;  
abgerufen am 02.Dezember 2010
- [60] ATZ-online: "Einheitliches Stecksystem für Elektrofahrzeuge"  
<http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/12406/Einheitliches-Stecksystem-fuer-Elektrofahrzeuge.html>;  
Autor: Christiane Brünglinghaus  
abgerufen am 18.September 2010
- [61] Auto Universum: "Elektroautos"  
<http://www.autouniversum.de/elektroautos.html>;  
Autor: Andreas Leue;  
abgerufen am 20.Oktober 2010
- [62] Automation Components: "Feuchtemess-Sensor"  
<http://www.acoweb.de/index.php/produkte.html>;  
abgerufen am 15.Dezember 2010
- [63] Balluff GmbH  
<http://balluff.com/Balluff/de/HomeChannel/de/>;  
abgerufen am 25.August 2010
- [64] Baumarkt: „Feuchtemessung an Bauteilen - so funktioniert es“  
<http://www.baumarkt.de/nxs/424///baumarkt/schablone1/Feuchtemessung-an-Bauteilen-so-funktioniert-es>;  
abgerufen am 24.November 2010
- [65] Bauthermografie und Luftdichtheitsprüfung: „Feuchte Stelle im Fußboden“  
<http://bauthermografie-luftdichtheit.de/27119.html>;  
abgerufen am 15.Dezember 2010
- [66] Berthold: "Neutronen-Feuchtemessung"  
[http://www.berthold.com/ww/de/pub/lb\\_350.cfm](http://www.berthold.com/ww/de/pub/lb_350.cfm);  
abgerufen am 15.Dezember 2010
- [67] Bilderarbeitungssysteme: „Bilderarbeitungssysteme“  
<http://www.bildverarbeitungssysteme.com/>;  
abgerufen am 24.November 2010

- [68] Bundesamt für Materialforschung und -prüfung  
[http://www.bam.de/microsites/zfp\\_kompendium/verz/findex\\_abc.html](http://www.bam.de/microsites/zfp_kompendium/verz/findex_abc.html);  
abgerufen am 26.August 2010
- [69] Chemgapedia: „Kalandrieren“  
<http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/reaktionstechnik/industrie/verarbeitung1.vlu/Page/vsc/de/ch/9/mac/reaktionstechnik/industrie/verarbeitung/kalan.vscml.html>;  
abgerufen am 24.November 2010
- [70] Chemie: „Lithium“  
<http://www.chemie.de/lexikon/Lithium.html>;  
abgerufen am 26.August 2010
- [71] Chemie am Auto: "Elektrische Energiespeicher"  
<http://www.chemie-am-auto.de/elektronik/index.htm>;  
abgerufen am 04.Januar 2011
- [72] Cognex: „Bildverarbeitung“  
<http://www.cognex.com/main.aspx?langtype=1031>;  
abgerufen am 21.Januar 2011
- [73] Conrad: „Labornetzgerät“  
<http://www.conrad.de/ce/de/product/512322/VOLTCRAFT-HPS-16010-EINSTL-LABOR-NETZG>;  
abgerufen am 21.Januar 2011
- [74] Die Deutsche Normungsroadmap;  
[http://www.e-energy.de/documents/DKE\\_Roadmap\\_Smart\\_Grid\\_230410\\_Deutsch.pdf](http://www.e-energy.de/documents/DKE_Roadmap_Smart_Grid_230410_Deutsch.pdf);  
abgerufen am 02.Dezember 2010
- [75] Digitalkamera: „Nikon Coolpix 4500“  
[http://www.digitalkamera.de/Kamera/Nikon/Coolpix\\_4500.aspx](http://www.digitalkamera.de/Kamera/Nikon/Coolpix_4500.aspx);  
abgerufen am 21.Januar 2011
- [76] Dow Jones: „E-Mobility“  
[http://www.djnewsletters.de/files/2005/DowJones\\_E-Mobility\\_AusgabeMai2010.pdf](http://www.djnewsletters.de/files/2005/DowJones_E-Mobility_AusgabeMai2010.pdf);  
abgerufen am 04.Januar 2011



- [77] Draminski: "Messung der elektrischen Leitfähigkeit"  
[http://www.draminski.de/products/moisture\\_meters/draminski\\_tester\\_wilgotnosci\\_do\\_siana\\_i\\_slomy\\_sprasowanej](http://www.draminski.de/products/moisture_meters/draminski_tester_wilgotnosci_do_siana_i_slomy_sprasowanej);  
abgerufen am 15.Dezember 2010
- [78] Edevis: "Thermografie"  
[http://www.edevis.de/thermography/thermography\\_overview\\_de.php](http://www.edevis.de/thermography/thermography_overview_de.php);  
abgerufen am 04.November 2010
- [79] Elektro-Mobil-Freunde-München: „Elektroauto“  
<http://www.emfm.de/elektroautos/index.php>;  
abgerufen am 15.Dezember 2010
- [80] Elektroauto Tipp: „Elektroauto“  
<http://www.elektroauto-tipp.de/modules.php?name=Battallg&file=battgesch>;  
abgerufen am 15.Dezember 2010
- [81] Elektroniknet.de: "Li-Ion-Batterien Made/Engineered in Germany"  
[http://www.elektroniknet.de/automotive/news/article/26399/0/Li-Ion-Batterien\\_MadeEngineered\\_in\\_Germany/](http://www.elektroniknet.de/automotive/news/article/26399/0/Li-Ion-Batterien_MadeEngineered_in_Germany/);  
Autor: Stephan Janouch  
abgerufen am 02.September 2010
- [82] Elweb: „Akkumulator“  
<http://www.elweb.info/dokuwiki/doku.php?id=akkumulator>;  
abgerufen am 31.August 2010
- [83] Energie verstehen: „Drohen uns Versorgungsrisiken?“  
<http://www.energie-verstehen.de/Energieportal/Navigation/Energieversorgung/energietraeger,did=309412.html?view=renderPrint>;  
abgerufen am 20.Dezember 2010
- [84] Europäisches Parlament: "EU-Batteriedirektive 2006/66/EG"  
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2006L0066:20060926:DE:PDF>;  
abgerufen am 15.Dezember 2010
- [85] Evonik: „Energieträger der Zukunft“  
[http://corporate.evonik.com/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Corporate/de/Chemie/Produkte/Product-Stories/2010\\_apr\\_20\\_Energietr%C3%A4ger%20der%20Zukunft\\_d%20.pdf](http://corporate.evonik.com/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Corporate/de/Chemie/Produkte/Product-Stories/2010_apr_20_Energietr%C3%A4ger%20der%20Zukunft_d%20.pdf);  
abgerufen am 31.August 2010

- [ 86] Evonik: „Energiespeicherung und Lithium-Ionentechnologie“  
<http://www.gdch.de/strukturen/sec/tagung/3rdsecjt/barenschee.pdf>;  
abgerufen am 31.August 2010
- [87] FH-Landshut: „Lithium-Ionen-Akkumulator“  
[http://people.fh-landshut.de/~mbl\\_x5/MBL\\_X5/Knowledge\\_files/Lithium-Ionen-Akkumulator%20in%20Hochvolt-Batterie.pdf](http://people.fh-landshut.de/~mbl_x5/MBL_X5/Knowledge_files/Lithium-Ionen-Akkumulator%20in%20Hochvolt-Batterie.pdf)  
abgerufen am 19.Januar 2011
- [88] Fraunhofer Visio: „Wärmefluss-Thermographie“  
<http://www.vision.fraunhofer.de/de/presse/150.html>;  
abgerufen am 20.Dezember 2010
- [89] Freyn, Axel: „Shape from Shading“  
<http://www.mpi-inf.mpg.de/departments/irg3/ss04/goerlitz/ShapeFromShading-Axel-Freyn.pdf>;  
abgerufen am 16.Dezember 2010
- [90] GFMesstechnik: „Streifenprojektion“  
<http://www.gfm-webshop.com/Technologie/>;  
abgerufen am 15.Dezember 2010
- [91] Goldmann, Daniel: "Recycling von Batterien"  
[http://www.efzn.de/fileadmin/Veranstaltungen/Nds\\_Energietage/2009/Fachforum\\_2/Goldmann\\_Recycling\\_von\\_Batterien\\_\\_NET2009\\_.pdf](http://www.efzn.de/fileadmin/Veranstaltungen/Nds_Energietage/2009/Fachforum_2/Goldmann_Recycling_von_Batterien__NET2009_.pdf);  
abgerufen am 02.Dezember 2010
- [92] GreCon: „Feuchtemessung mit Infrarottechnik“  
[http://www.grecon.de/files/pdfs/products/2009/grecon\\_ir\\_5000\\_r01\\_de\\_web.pdf](http://www.grecon.de/files/pdfs/products/2009/grecon_ir_5000_r01_de_web.pdf);  
abgerufen am 13.Dezember 2010
- [93] GreCon: „Feuchtemessung mit Mikrowellentechnik“  
[http://www.grecon.de/grecon\\_product\\_mwf\\_5000\\_de.php](http://www.grecon.de/grecon_product_mwf_5000_de.php);  
abgerufen am 13.Dezember 2010
- [94] Heise: „Schweflige Hoffnung“  
<http://www.heise.de/tr/artikel/Schweflige-Hoffnung-276451.html>  
abgerufen am 19.Januar 2011

- [95] Hybridautos: „Lithium-Ionen Batterie von SB LiMotive“  
<http://www.hybrid-autos.info/Energiespeicher/Elektrischer-Speicher/lithium-ionen-batterie-von-sb-limotive.html>;  
abgerufen am 16.Dezember 2010
- [96] IAV: "Elektromobilität - Strom aus der Straße"  
[http://www.iav.com/\\_downloads/de/handouts/fahrzeugelektronik/090908\\_Elektro\\_StromausderStrasse\\_de\\_WEB.pdf](http://www.iav.com/_downloads/de/handouts/fahrzeugelektronik/090908_Elektro_StromausderStrasse_de_WEB.pdf);  
abgerufen am 03.September 2010
- [97] idw: "SPARC 3D-Oberflächeninspektion"  
<http://idw-online.de/pages/de/news303972>;  
abgerufen am 16.Dezember 2010
- [98] InfraTec: "Thermografie"  
<http://www.infratec.de/de/thermografie/infrarotkameras/theorie/grundlagen.html>;  
abgerufen am 18.November 2010
- [99] Innovations-Report „Aktive Wärmefluss-Thermographie zur Qualitätssicherung“  
[http://www.innovations-report.de/html/berichte/energie\\_elektrotechnik/bericht-41681.html](http://www.innovations-report.de/html/berichte/energie_elektrotechnik/bericht-41681.html);  
abgerufen am 18.November 2010
- [100] Jotero: "Grundprinzip der Streifenprojektion - phasenmessende Triangulation"  
<http://www.jotero.com/temp/streifenprojektion.pdf>;  
abgerufen am 16.Dezember 2010
- [101] Kevag: „Was versteht man unter Elektromobilität?“  
<http://www.kevag.de/index.php?id=1231>;  
abgerufen am 18.November 2010
- [102] Kraftfahrt-Bundesamt: "Fahrzeugklassen und Aufbauarten - 1955 bis 2010"  
[http://www.kba.de/nn\\_191172/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/b\\_\\_fzkl\\_\\_zeitreihe.html](http://www.kba.de/nn_191172/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/b__fzkl__zeitreihe.html);  
abgerufen am 31.August 2010

- [103] LED-Tech: „LED-Lampe“  
[http://www.led-tech.de/de/High-Power-LEDs-Cree/CREE-Module/4-x-CREE-MC-E-auf-Rund-Platine-LT-1679\\_120\\_117.html](http://www.led-tech.de/de/High-Power-LEDs-Cree/CREE-Module/4-x-CREE-MC-E-auf-Rund-Platine-LT-1679_120_117.html);  
[http://www.led-tech.de/produkt-pdf/cree/xlamp\\_mce.pdf](http://www.led-tech.de/produkt-pdf/cree/xlamp_mce.pdf);  
abgerufen am 21.Januar 2011
- [104] Magnet Lab: „Werner von Siemens“  
<http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/pioneers/siemens.html>;  
abgerufen am 31.August 2010
- [105] Marktübersichten  
<http://www.aktuelletechnik.ch/web/internetat.nsf/marktuebersichten?readform&nav=100.03&hrnav=0&NPRreset=1&start=11&count=10>;  
abgerufen am 27.August 2010
- [106] Maschinenmarkt: „2D Laser-Wegmesssensor“  
<http://www.maschinenmarkt.vogel.de/index.cfm?pid=1204&pk=179618&fk=42960&op=cp>;  
abgerufen am 15.Dezember 2010
- [107] MEL Mikroelektronik GmbH  
<http://www.melsensor.de/>;  
abgerufen am 02.September 2010
- [108] Micro-Epsilon  
<http://www.micro-epsilon.com/products/dimension-2D-3D-sensors/laser-scanner-profile-sensor/Laser-scanner-selection/index.html?select=r1c3>;  
abgerufen am 15.Dezember 2010
- [109] Mining intelligence series, Business News America: "The future of Lithium"  
[http://www.salareslithium.com/i/pdf/Media/Lithium\\_2010\\_BNA.pdf](http://www.salareslithium.com/i/pdf/Media/Lithium_2010_BNA.pdf);  
abgerufen am 02.Dezember 2010
- [110] Motorlexikon: "Batteriemanagement"  
<http://www.motorlexikon.de/?l=9508>;  
abgerufen am 23.September 2010
- [111] Motorlexikon: "Lithium-Ionen-Batterie"  
<http://www.motorlexikon.de/?l=9478>;  
abgerufen am 03.Januar 2011

- [112] N-TV: "Alles hängt an der Batterie"  
<http://www.n-tv.de/auto/Alles-haengt-an-der-Batterie-article1037341.html>;  
abgerufen am 25.August 2010
- [113] NDT: „Reifenprüfung mit dem Lichtschnittverfahren“  
<http://www.ndt.net/article/dgzfp04/papers/v32/v32.htm>;  
abgerufen am 26.September 2010
- [114] Nikon: „Mikroskop SMZ 1000“  
[http://www.nikoninstruments.eu/de\\_CH/Produkte/Mikroskopsysteme/Stereomikroskope/SMZ1000/\(key\\_features\)](http://www.nikoninstruments.eu/de_CH/Produkte/Mikroskopsysteme/Stereomikroskope/SMZ1000/(key_features));  
abgerufen am 19.Januar 2011
- [115] Online Library: „Feuchtemessung durch Infrarotreflexion“  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cite.330350111/pdf>;  
abgerufen am 05.Dezember 2010
- [116] Or Laser: „Laserstrahl“  
<http://www.or-laser.com/de/technologie/laser-schneiden.html>;  
abgerufen am 24.November 2010
- [117] Polytec: „Weißlicht-Interferometrie“  
<http://www.polytec.com/de/loesungen/oberflaechenprofile-messen/grundlagen-der-weisslicht-interferometrie/>;  
abgerufen am 16.Dezember 2010
- [118] Pressebox: „Hochauflösende monochrome Camera-Link Zeilenkamera mit 8192 Pixel/Zeile für die industrielle Bildverarbeitung und Machine Vision - die e2v AViiVA UM4“  
<http://www.pressebox.de/pressemeldungen/rauscher-gmbh-systemberatung-fuer-computer-und-angewandte-grafik/boxid/157139>;  
13. Dezember 2010
- [119] Pro Physik: „Partikel im Streiflicht“  
<http://www.pro-physik.de/Phy/leadArticle.do?laid=3524>;  
abgerufen am 18.Dezember 2010
- [120] Pulsotronic GmbH & Co. KG  
<http://pulsotronic.de/>;  
abgerufen am 18.August 2010

- [121] Retsch GmbH: „Sieb“  
<http://www.retsch.de/de/produkte/sieben/analysensiebe/>;  
abgerufen am 21.Januar 2011
- [122] Schott AG: „Faseroptische Lichtquelle“  
[http://www.schott.com/austria/german/download/kl\\_prospekt\\_d.pdf](http://www.schott.com/austria/german/download/kl_prospekt_d.pdf);  
abgerufen am 21.Januar 2011
- [123] silo world - Das Schüttgut-Magazin  
<http://www.schuettgutportal.com/downloads/feuchtemessung.pdf>;  
abgerufen am 13.Dezember 2010
- [124] SmartRay GmbH: „Lichtschnittverfahren“  
<http://www.smartray.de/uploads/files/343c622be71d2834881675b94f7627bdef7a97bc.pdf>;  
abgerufen am 16.Dezember 2010
- [125] Spectronet: „Kleberauppenüberwachung und Qualitätssicherung“  
[http://spectronet.de/portals/visqua/story\\_docs/vortraege\\_2006/060712\\_mv\\_excellence/060612\\_01\\_metge\\_inos.pdf](http://spectronet.de/portals/visqua/story_docs/vortraege_2006/060712_mv_excellence/060612_01_metge_inos.pdf);  
Autor: Metge, Jan-Thomas  
abgerufen am 16.Oktober 2010
- [126] Spieker: „Qualitätssicherung“  
<http://www.spieker.biz/qualitaetsmanagement/aufbau%20der%20iso%209001/iso%20begriffe.htm>;  
abgerufen am 16.Januar 2011
- [127] SRT: „Rissprüftechnik“  
[http://www.srt-aalen.de/index-Dateien/Ultraschall\\_Risspruefung\\_Ultraschallrisspruefung\\_Ultraschallpruefung.htm](http://www.srt-aalen.de/index-Dateien/Ultraschall_Risspruefung_Ultraschallrisspruefung_Ultraschallpruefung.htm);  
abgerufen am 20.Dezember 2010
- [128] Stemmer-Imaging: „Hochauflösende Zeilenkameras“  
<http://www.stemmer-imaging.co.uk/de/pages/news/news.php?index=2009>;  
abgerufen am 21.Januar 2011
- [129] Tahil, William: "The trouble with Lithium"  
[http://tyler.blogware.com/lithium\\_shortage.pdf](http://tyler.blogware.com/lithium_shortage.pdf);  
abgerufen am 23.November 2010

- [130] Tech Channel: „Lithium-Luft-Akkus sollen Lithium-Ionen-Akkus ablösen - IBM forscht an der Akku-Zukunft“  
[http://www.tecchannel.de/pc\\_mobile/news/2023667/mit\\_lithium\\_luft\\_batterie\\_800\\_km\\_weit\\_fahren/](http://www.tecchannel.de/pc_mobile/news/2023667/mit_lithium_luft_batterie_800_km_weit_fahren/);  
abgerufen am 03.Januar 2011
- [131] Technologie Review: "Kapazitätssprung bei Lithium-Ionen-Batterien"  
<http://www.heise.de/tr/artikel/Kapazitaetssprung-bei-Lithium-Ionen-Batterien-1094675.html>;  
Autor: Katherine Bourzac  
abgerufen am 25.September 2010
- [132] Theodor-Heuss-Gymnasium: „Ultraschallprüfung“  
[http://www.thg-radevormwald.de/unterrichtsfächer/physik/Bericht\\_Ultraschall.pdf](http://www.thg-radevormwald.de/unterrichtsfächer/physik/Bericht_Ultraschall.pdf);  
abgerufen am 25.November 2010
- [133] Trockentechnik Austria: „Messung der Luftfeuchte“  
<http://www.entfeuchter-bautrockner.at/produkte/zubehoer/messgeraete.html>;  
abgerufen am 15.Dezember 2010
- [134] TÜV Süd: „Messung der Hochgeschwindigkeitstopographie von Reifen mittels Laser-Lichtschnittverfahren“  
[http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1134986810392685473462/19\\_kostka\\_d.pdf](http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1134986810392685473462/19_kostka_d.pdf);  
Autor: Kostka, Günther; Schmitt, Peter  
abgerufen am 15.Dezember 2010
- [135] Umweltbewusst heizen  
<http://www.umweltbewusst-heizen.de/verkehr/CO2-Vergleich-PKW-Flug.html>;  
abgerufen am 21.Oktober 2010
- [136] Umweltbundesamt: „CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland“  
<http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2842>;  
abgerufen am 21.Oktober 2010
- [137] USGS: „Lithiumverwendung“  
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2010-lithi.pdf>;  
abgerufen am 02.Dezember 2010

- [138] VDA: „Automobilproduktion“  
<http://www.vda.de/de/zahlen/jahreszahlen/automobilproduktion/>;  
abgerufen am 21.September 2010
- [139] Vitronic: „Laserschnittverfahren“  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/latj.200790192/pdf>;  
abgerufen am 15.Dezember 2010
- [140] Dr. Wiesner Steuerungstechnik GmbH  
<http://drwiesner.de/>;  
abgerufen am 26.August 2010
- [141] Wikipedia: „Lithium-Ionen-Akkumulator - Funktionsweise“  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator>;  
abgerufen am 21.September 2010
- [142] Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: „Qualitätskontrolle bei Laserschweißnähten“  
Autor: Döttinger, Christoph  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/latj.200990086/pdf>;  
abgerufen am 21.September 2010
- [143] Wir in Südamerika: „Salar de Atacama“  
<http://www.wir-in-suedamerika.net/Route/salaratacama.html>;  
abgerufen am 21.September 2010
- [144] Wired: "Elektromote"  
<http://www.wired.com/thisdayintech/2010/04/0429first-trolleybus/>;  
abgerufen am 20.Oktober 2010
- [145] Welzel Anlagen: „Elektrolyt“  
<http://www.welzel-anlagen.de/cms/wasserversorgung/wasserversorgung.html>;  
abgerufen am 17.Januar 2011
- [146] ZDNet: "Neue Lithium-Ionen-Akkus schaffen zehnfache Laufzeit";  
[http://www.zdnet.de/news/wirtschaft\\_investition\\_hardware\\_neue\\_lithium\\_ionen\\_akkus\\_schaffen\\_zehnfache\\_laufzeit\\_story-39001021-39159874-1.htm](http://www.zdnet.de/news/wirtschaft_investition_hardware_neue_lithium_ionen_akkus_schaffen_zehnfache_laufzeit_story-39001021-39159874-1.htm);  
Autor: Widmann, Britta  
abgerufen am 24.September 2010



### **Selbständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Alle Teile, die wörtlich oder sinngemäß einer Veröffentlichung entstammen, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde noch nicht veröffentlicht oder einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Augsburg, den 28. Januar 2011

---

Jacqueline Damm